



Année Universitaire : 2011-2012

**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'impact de perte en vitesse sur les performances de l'atelier de production de l'acide sulfurique -Maroc phosphore II-

Présenté par:

GHARIB SAMIRA

Encadré par:

- Pr. BOUKIR Abdellatif (FST Fès)
- Mr. ATIAT ALLAH Mohamed (OCP de Safi)

Soutenu Le 22 Juin 2012 devant le jury composé de:

- Pr. BOUKIR Abdellatif
- Pr. LAMCHARFI El Hadi
- Pr. BOUAYAD Abdelouahed
- Pr. SKALLI Khalid

Stage effectué à : L'atelier sulfurique de Maroc phosphore II - OCP de Safi -





Année Universitaire : 2011-2012

Master Sciences et Techniques : Génie des Matériaux et des Procédés

Nom et prénom: GHARIB Samira

Titre: Etude de l'impact de perte en vitesse sur les performances de l'atelier de production de l'acide sulfurique -Maroc phosphore II

Résumé

L'objectif fondamental de ce projet consiste à étudier l'impact de la perte en vitesse sur les performances de l'atelier sulfurique de Maroc phosphore II à Safi. Pour effectuer cette étude, on a appliqué la méthode de résolution des problèmes. Cette méthode nous a permis d'identifier les causes, de les regrouper par famille, et de les représenter au diagramme d'ISHIKAWA.

La représentation des résultats du recensement des causes au diagramme de PARETO permet de reconnaître les causes les plus influentes. Ensuite, on a proposé des solutions adéquates.

En vue de réduire les effets de la perte en vitesse d'une manière efficiente, il est nécessaire d'investir judicieusement les solutions proposées dans le présent rapport et surtout celles qui visent la bonne gestion des flux.

Mots-clés : Perte en vitesse, MRP, Encrassement, Acide sulfurique, Vapeur à haute pression, Procédé, Atelier sulfurique, Centrale thermique, Filtres bougies, Filtre à gaz chaud, OCP.





Dédicaces

A mes chers parents qui m'ont toujours apportée amour, sacrifices, soutien, encouragement et réconfort. Rien au monde ne pourrait compenser tous les sacrifices qu'ils ont consentis pour mon éducation et ma réussite afin que je puisse atteindre et réaliser mes objectifs. Aucune dédicace ne saurait exprimée ma reconnaissance, mon grand attachement et mon profond amour. Que ce modeste travail soit pour eux le fruit de tous leurs efforts et leurs nobles sacrifices.

A mes sœurs et mes frères, avec tous mes vœux de les voir réussir dans leurs vies.

A tous les membres de ma famille sans exception.

A tous mes amis, à qui je souhaite le succès.

A toutes les personnes qui ont participées à l'élaboration de ce projet.

Si ce modeste projet mérite une valeur, je le dédie à toutes ces personnes.



Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier ALLAH, le tout puissant, qui m'a donné la force d'accomplir ce modeste projet.

Au terme de ce stage, je tiens à remercier vivement Monsieur le chef de Production Utilités et Sulfurique monsieur EL MESNAOUI pour la confiance qu'il m'a témoignée en m'a accordant un stage de quatre mois au sein du service production de l'acide sulfurique.

Je tiens aussi à témoigner ma profonde gratitude et mes vifs remerciements à Monsieur Mohamed ATTIAT ALLAH pour son encadrement, ses conseils et son aide.

Mes vifs remerciements et ma gratitude vont à mon professeur monsieur Abdellatif BOUKIR, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de FES d'avoir bien voulu m'encadrer durant ce stage et dont les conseils et les remarques m'ont été profitables.

Je remercie aussi tous les membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Mes remerciements vont également au Pr. IJALI Mustapha, responsable du Master Génie des Matériaux et des Procédés.

Je n'oublie pas de remercier tous les personnels de service de production d'acide sulfurique de la division MAROC PHOSPHORE II qui m'ont aidé soit de près ou de loin et surtout Messieurs BENAZZOUZ et JEDDOU pour pouvoir réaliser ce travail.

C'est aussi un devoir et un plaisir d'exprimer mon amitié et ma reconnaissance à tous mes amis et collègues de la promotion qui m'ont soutenu moralement tout au long de mon stage et à toutes les personnes qui m'ont prodiguées leur aide de près ou de loin.

Merci à tous.



Liste des figures

- Figure 1 : Carte géographique des sites miniers distribués sur le royaume*
- Figure 2 : Organigramme du site Maroc Phosphore de Safi*
- Figure 3 : Schéma montrant l'organigramme de MP L*
- Figure 4 : Schéma de circuit de production au niveau de MP II*
- Figure 5 : Viscosité de soufre en fonction de la température*
- Figure 6 : Schéma de la turbosoufflante*
- Figure 7 : Schéma du four*
- Figure 8 : Schéma du filtre à gaz chaud*
- Figure 9 : Schéma du convertisseur*
- Figure 10 : Schéma de l'économiseur*
- Figure 11 : Schéma de la tour d'absorption*
- Figure 12 : Schéma de circuit de gaz*
- Figure 13 : Schéma de circuit d'acide*
- Figure 14 : Schéma de circuit eau vapeur*
- Figure 15 : Diagramme d'ISHIKAWA*
- Figure 16 : Diagramme de Pareto de la ligne A*
- Figure 17 : Diagramme de Pareto de la ligne B*
- Figure 18 : Diagramme de Pareto de la ligne C*
- Figure 19 : Diagramme de priorité pour le bouchage des brûleurs*
- Figure 20 : Diagramme de priorité pour l'augmentation de la T° du palier avant soufflante*
- Figure 21 : Diagramme de priorité pour l'encrassement du filtre à gaz chaud*
- Figure 22 : Diagramme de priorité de l'encrassement des filtres bougies*
- Figure 23 : Schéma des entrées-sorties du four*
- Figure 24 : Schéma des entrées-sorties du convertisseur*



Liste des tableaux

- Tableau 1 :** *Propriétés physico-chimiques de l'acide sulfurique*
- Tableau 2 :** *Répartition du catalyseur dans le convertisseur*
- Tableau 3 :** *Les étapes de déroulement de la méthode MRP*
- Tableau 4 :** *Effet des causes sur la production de H_2SO_4 (linge A)*
- Tableau 5 :** *Effet des causes sur la production de H_2SO_4 (ligne B)*
- Tableau 6 :** *Effet des causes sur la production de H_2SO_4 (ligne C)*
- Tableau 7 :** *Origine des causes*
- Tableau 8 :** *Impact de la perte en vitesse sur la production de H_2SO_4 , P_2O_5 , Vapeur et en énergie*
- Tableau 9 :** *Action proposés pour la diminution des pertes rencontrées*
- Tableau 10:** *Résumé du bilan matière*



Liste des abréviations

BP	: Basse pression
CAP	: Concentration d'acide phosphorique
HP	: Haute pression
M	: Masse molaire
MP	: Moyenne pression
MP II	: Maroc phosphore II
MWH	: Mégawatt heure
Q_M	: Débit molaire
Q_m	: Débit massique
Q_v	: Débit volumique
TA	: Tour d'absorption
TMH	: Tonne monohydratée
TS	: Tour de séchage





SOMMAIRE

Introduction générale	1
PARTIE I : PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL	
I. Présentation du groupe office chérifien de phosphate	3
II. Présentation du Maroc Phosphore de Safi	4
III. Présentation du Maroc Phosphore II	5
PARTIE II :PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE	
I. Généralités	9
I.1 Aperçu général sur le soufre	9
I.1.1 Existence et préparation	9
I.1.2 Propriétés physiques et variétés allotropiques	9
I.1.3 Importation du soufre solide	10
I.2 Aperçu général sur l'acide sulfurique	10
I.2.1 Utilisation de l'acide sulfurique	10
I.2.2 Propriétés Physicochimiques	11
I.2.3 Informations toxicologiques	11
I.2.4 Fabrication industrielle	12
II. Principe de fabrication de l'acide sulfurique	12
III. Description des équipements	13
III.1 Turbosoufflante	13
III.2 Tour de séchage	14
III.3 Fosse à soufre	15
III.4 Four	15
III.5 Chaudière de récupération / ballon	15
III.6 Filtre à gaz chaud	16
III.7 Convertisseur	17
III.8 Economiseur	18
III.9 Surchauffeurs I et II	19
III.10 Tour d'absorption	19
III.11 Refroidisseurs tubulaires	20
III.12 Bacs de stockage de l'acide sulfurique	21
IV. Description du procédé de fabrication de l'acide sulfurique	21
IV.1 Circuit de gaz	21
IV.2 Circuit d'acide	23



PARTIE III : PARTIE EXPERIMENTALE

Objectifs

A. Savon Etude de l'impact de perte en vitesse sur les performances de l'atelier de production de l'acide sulfurique

Introduction	27
I. Positionnement du problème	28
II. Recensement des causes	28
III. Diagramme de causes à effet ou diagramme d'Ishikawa	29
IV. Analyse des causes principales des lignes A, B et C	30
IV.1 Analyse des causes de ligne A	30
1. Résultats	30
2. Diagramme de Pareto	31
IV.2 Analyse des causes de ligne B	31
1. Résultats	31
2. Diagramme de Pareto	32
IV.3 Analyse des causes de ligne C	33
1. Résultats	33
2. Diagramme de Pareto	34
V. Origine des causes	35
VI. Impact de perte en vitesse au niveau de la production	36
VI. Actions proposées	37
VII.1 Criblage des actions proposées	37
A. Priorisation des solutions	38
B. Diagrammes de priorités	38
B.1 Bouchage des brûleurs	38
B.2 Augmentation de température de palier avant soufflante	39
B.3 Encrassement du filtre à gaz chaud	40
B.4 Encrassement des filtres bougies	40
VII.2 Réalisation des actions définis	41
1) Ligne A	41
3) Ligne C	42
Conclusion	43
B. Etude du bilan matière	44
Introduction	44



I. Bilan matière de la ligne sulfurique	44
I.1 Présentation des données	44
I.2 Production horaire d'acide sulfurique H_2SO_4	44
I.3 Etape de combustion	45
a) Calcul des débits du soufre liquide	45
b) Calcul des débits des gaz sortant du four	46
c) Calcul du débit d'air à l'entrée du four	47
d) Calcul du débit d' O_2 à la sortie du four	47
I.4 Etape de la conversion	48
1. Débit d' O_2 consommé dans l'étape de la conversion	48
2. Débit de SO_3 formé	48
3. Débit d' O_2 à la sortie de la cheminée	48
4. Débit de N_2 à la sortie de la cheminée	49
5. Débit du SO_2 à la sortie de la cheminée	49
I.5 Etape de l'absorption	49
1. Calcul du débit massique de l'eau dans la tour d'absorption	49
Conclusion	50
Conclusion générale	51
Bibliographie & webographie	52
Annexes	53



Introduction générale

Actuellement les ressources énergétiques mondiales tendent à disparaître jour après jour, surtout celles utilisées pour la génération de l'électricité ; en effet les pertes énergétiques ne sont plus tolérables, une entreprise dans un tel contexte ne peut persister que s'elle exploite ses ressources d'une façon optimale.

La nouvelle stratégie de l'office chérifien de phosphate est fondée sur l'exploitation de ses propres ressources pour générer ses besoins en électricité, en l'occurrence la vapeur de l'eau chauffée avec la chaleur libérée le long du procédé de fabrication de l'acide sulfurique ; cette vapeur est destinée vers la centrale thermoélectrique où elle se transforme en électricité. C'est pour cela, le procédé de fabrication de l'acide sulfurique occupe une place très importante dans l'industrie de transformation des phosphates au Maroc. Il permet d'une part de produire l'acide sulfurique pour la réaction d'élaboration de l'acide phosphorique, et d'autre part de produire une grande partie de l'énergie nécessaire au fonctionnement du complexe chimique. Par conséquent, les performances de toute la division sont principalement liées à celles de l'atelier sulfurique.

Le présent travail consiste à élaborer une étude pour l'optimisation des performances de l'atelier sulfurique rendant compte des principaux phénomènes décrivant de façon détaillée la production au niveau des trois unités de l'atelier sulfurique et les résultats obtenus.

Ce présent rapport comporte trois parties :

- La première partie sera consacrée à la description de l'organisme d'accueil.
- La deuxième partie exposera un aperçu général sur la matière première et le produit fini, et la description du procédé de fabrication de l'acide sulfurique, ainsi que les différents équipements sulfuriques.
- Et enfin, La troisième partie va mettre l'accent sur :



- L'étude de l'impact de la perte en vitesse sur les performances de l'atelier sulfurique. Dans cette partie, nous avons effectué une analyse de certaines difficultés techniques qui traduisent cette perte. Sur la lumière de cette analyse, nous avons dressé un plan d'action afin de le mettre en œuvre et de pallier en partie aux causes de cette perte de cadence.
- Et enfin, nous avons effectué une étude du bilan matière au niveau d'une ligne de production de l'acide sulfurique. Nous nous sommes intéressés aux débits de différentes matières mis en jeu et ce durant les étapes de combustion suivie de la conversion jusqu'à l'absorption.

I. Présentation du groupe office chérifien de phosphate

I.1 Historique



En 1912, le Maroc se rendit compte de ses richesses en phosphates, puis en février 1921 il a commencé ses exploitations effectives. Afin de protéger ses richesses nationales, la publication du dahir du 27 janvier 1920 attribué à l'Etat Marocain tous les droits de recherche, d'exploitation et de commercialisation de son phosphate.

La création de l'opérateur national a été promulguée dans le dahir du 7 août 1920. Une année plus tard, l'exploitation effective du phosphate commença au gisement d'Ouled Abdoun. La mise en exploitation du gisement de Gantour n'a commencé que 10 plus tard. Le deuxième centre d'exploitation minière était celui de Youssoufia, appelé anciennement « Louis Gentil » en 1931, et dont les premières exportations ont débuté en 1933.

A partir des années 60, et afin de répondre au marché international tout en développant une industrie locale du phosphate, l'OCP s'est intéressé à la valorisation locale du produit et à sa transformation en acide phosphorique et en engrais avant son exportation.

En 1979, l'OCP a commencé l'exploitation de la nouvelle zone minière du centre de Bengrir.

Actuellement, le Groupe OCP occupe une place importante tant au niveau national qu'international et joue un rôle important sur le plan économique du pays. Il fût le premier exportateur mondial du phosphate selon toutes ses formes.

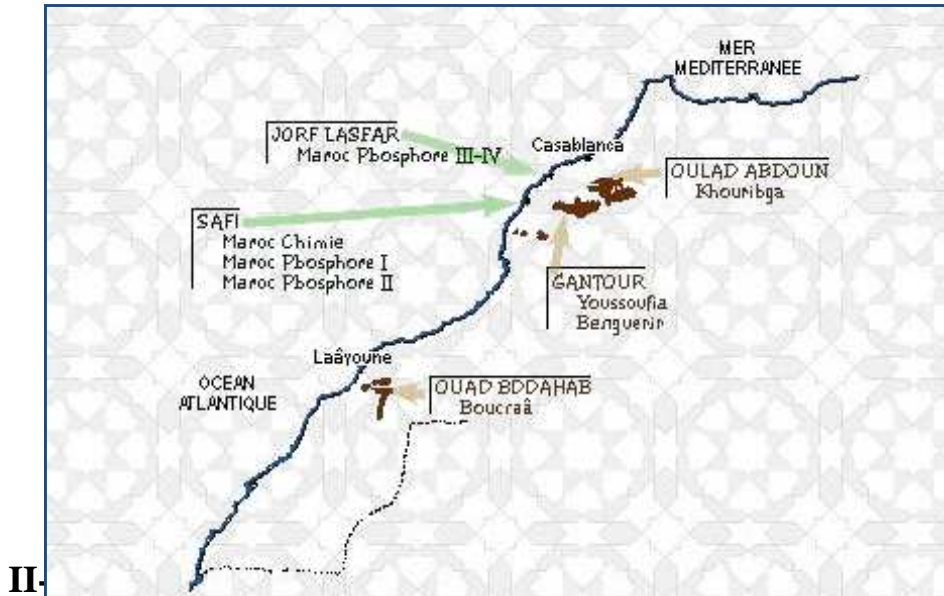
I.2 Activités du Groupe O.C.P

Le Groupe OCP s'intéresse à l'exploitation de la première richesse du Royaume à savoir le phosphate. Son activité est axée essentiellement sur l'extraction, le traitement et la commercialisation du phosphate, ainsi que les produits dérivés. Le phosphate provient des sites de Khouribga, Benguir, Youssoufia et Boucraâ-laâyoune, il est utilisé principalement dans la fabrication des engrais. Selon la nature du minerai. Le phosphate subit une ou plusieurs opérations de traitement (criblage, séchage, calcination, enrichissement à sec...). Une fois traité, il est exporté tel quel est à l'étranger ou bien livré aux industries chimiques du groupe à Jorf Lasfar ou à Safi, pour être transformé en produits dérivés commercialisables (acide phosphorique de base, acide phosphorique purifié et engrais solides).



I.3. Localisation géographique

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



II.1. Introduction

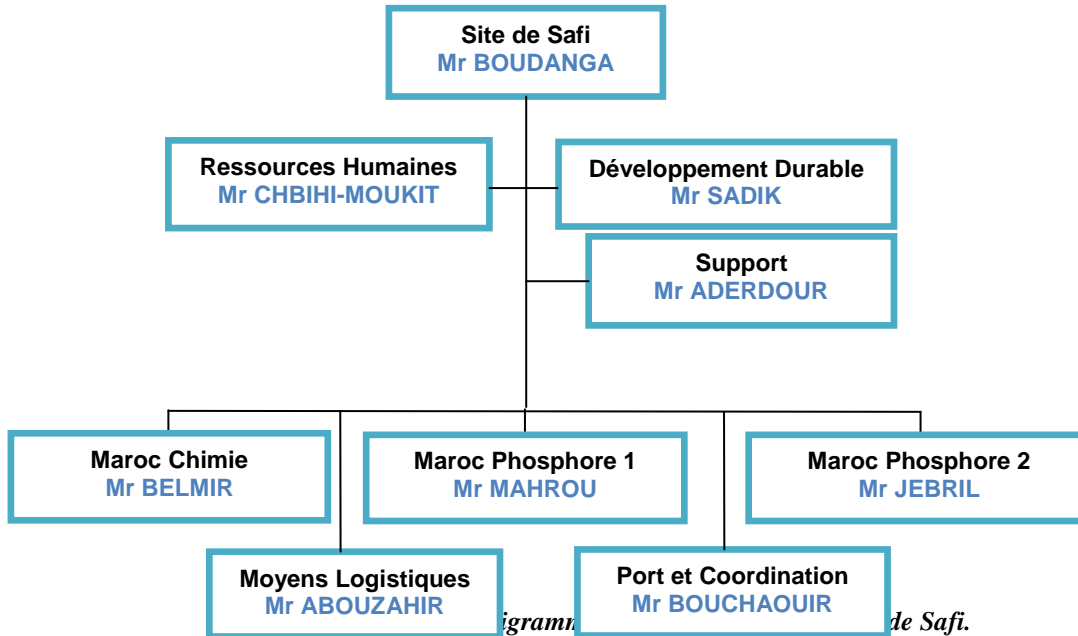
Ce complexe chimique Maroc phosphore de Safi fait partie du groupe OCP, et il est considéré comme l'une des plus grandes plates-formes de fabrication de l'acide phosphorique dans le monde. Il est situé au sud ouest de la ville de Safi et à environ 10 Km. Cet emplacement est justifié par deux raisons :

- La présence d'une voie ferrée permettant l'approvisionnement en phosphate brut à partir de Youssoufia et Benguézir ainsi qu'une ligne ferroviaire avec le port de Safi ;
- La proximité de la côte atlantique pour l'utilisation de l'eau de mer en tant que fluide réfrigérant.



II.2 Organigramme du site Maroc Phosphore Safi

L'organigramme du Maroc phosphore de Safi se présente sous la forme suivante.

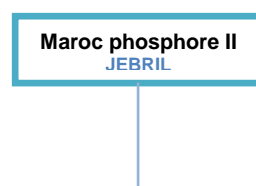


III. Présentation du Maroc Phosphore II « MP II »

III.1. Introduction

Le complexe Maroc Phosphore II, était mis en service depuis 1981, et a été destiné à la production de l'acide phosphorique clarifié, avec une capacité de 480.000 T /an de P_2O_5 .

III.2. Organigramme de MPII



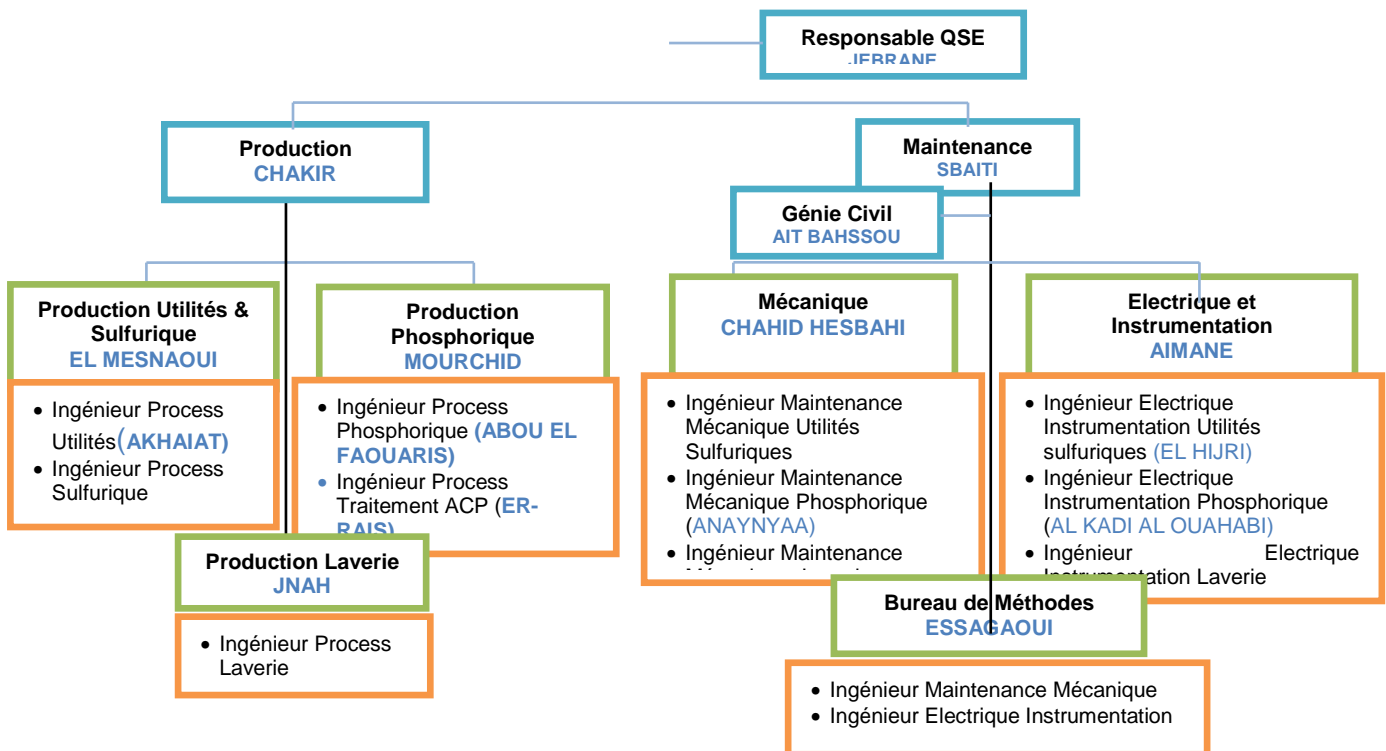


Figure 3 : Schéma montrant l'organigramme de MP II.

III.3 Diagramme du fonctionnement de la division MP II

Cette division est composée de quatre ateliers de production, on peut citer :

- L'atelier sulfurique,
- L'atelier de lavage de phosphate,
- L'atelier phosphorique,
- Et enfin l'atelier énergie et fluides (Centrale thermique, Traitement d'eau douce et pompage d'eau de mer).

Le schéma suivant représente les différentes étapes du traitement du phosphate brut ainsi que le circuit de production de l'acide sulfurique 98% et l'acide phosphorique à 54% en P_2O_5 au sein du complexe MP II.

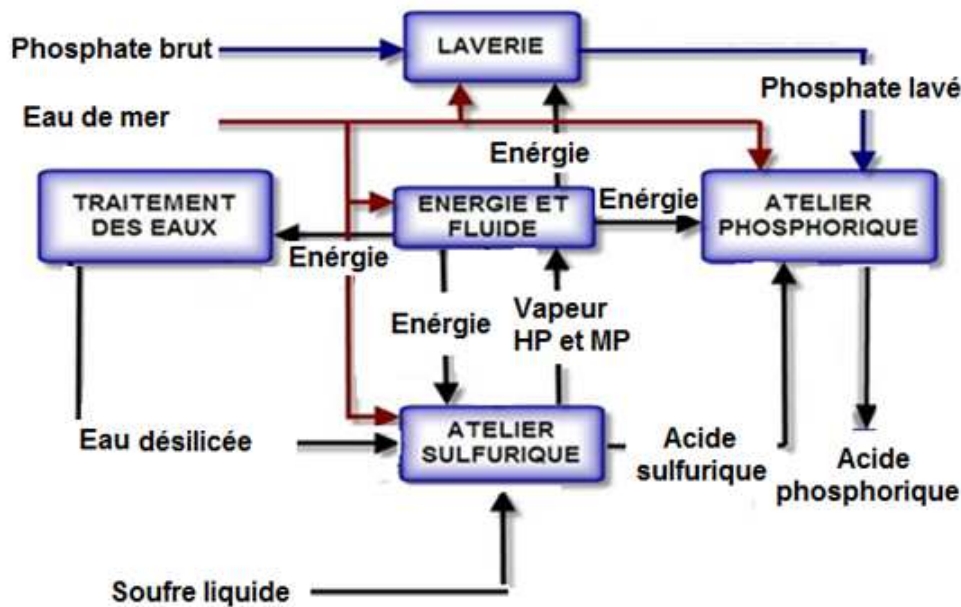


Figure 4 : Schéma de circuit de production au niveau de MP II.

❖ *Atelier de l'acide sulfurique*

L'atelier de l'acide sulfurique du Maroc Phosphore II (MP II) comprend trois lignes identiques A, B et C de capacité de production unitaire 1750 t/j d'acide sulfurique concentré à 98,5 % selon le procédé simple d'absorption "MONSANTO".

Il assure en outre la production de la vapeur à haute pression (57 bar à 490°C) à partir des chaudières de récupération. La production de l'acide sulfurique 98,5 % subit une dilution pour atteindre la valeur de 84% qui est nécessaire pour la fabrication de l'acide phosphorique.

❖ *Atelier de l'acide phosphorique*

L'atelier phosphorique de la division MP II a été conçu selon le procédé NISSAN et permet la production de l'acide phosphorique titrant à 54% en P_2O_5 .

Il est constitué de trois lignes de réactions A, B, C et six lignes de concentrations A, B, C, D, F et H.

Chaque ligne de réactions est approvisionnée en phosphate issu de la laverie et en acide sulfurique issu de l'atelier sulfurique. Sa production est de 1500 t/j de P_2O_5 .

❖ *Atelier énergie et fluides*

L'atelier énergie et fluides est constitué des unités suivantes:



- Unité de traitement d'eau douce,
- Station de pompage d'eau de mer,
- Et une centrale thermoélectrique.

Cet atelier permet d'alimenter le complexe par les besoins nécessaires, comme:

- ☉ Les différents qualités de l'eau : eau filtrée, eau déminéralisée, eau désilicée, eau alimentaire et eau de mer ;
- ☉ La vapeur moyen pression MP,
- ☉ L'air comprimé ;
- ☉ Et l'énergie électrique fournie par deux groupes turboalternateurs.

❖ *Atelier laverie*

L'atelier laverie de MP II comprend cinq secteurs, on peut citer :

- Le secteur de déchargement du phosphate ;
- Le secteur de manutention du phosphate brut ;
- Le secteur des lignes de lavage ;
- Le secteur de manutention du phosphate lavé ;
- Et le secteur de mise à teruil.



I. Généralités

I.1 Aperçu général sur le soufre

Le soufre est un élément chimique de la famille des chalcogènes, de symbole S et de numéro atomique 16.

C'est un non-métal multivalent abondant, inodore, insipide, et insoluble dans l'eau. Le soufre est surtout connu sous la forme de cristaux jaunes et se trouve dans beaucoup de minéraux (sulfure et sulfate) et même sous forme native, particulièrement dans les régions volcaniques. L'essentiel du soufre exploité est cependant d'origine sédimentaire.

I.1.1 Existence et préparation

Le soufre existe sous plusieurs formes dans la nature :

- A l'état natif dans les terrains volcaniques et certaines terres sédimentaires (Louisiane, Texas).
- Extrait à partir des sulfures : H_2S (15% du gaz de Lacq), FeS_2 (pyrites), ZnS (blende), PbS (galène) et des sulfates (anhydrite ou gypse CaSO_4).

Pour extraire le soufre natif (Calcacaroni en Sicile), on fait des meules de soufre de 4 m de haut, on y met le feu, le soufre fond et coule. Il est alors récupéré en lingots.

Le soufre est récupéré aussi à partir du gaz naturel : H_2S est brûlé en SO_2 , puis SO_2 réagit avec H_2S pour donner du soufre :



I.1.2 Propriétés physiques et variétés allotropiques

Le soufre est un très mauvais conducteur de la chaleur et de l'électricité, d'où le "cri du soufre" lorsque l'on plonge un canon de soufre dans de l'eau bouillante. Il s'électrise par frottement : c'est un diélectrique.

Il existe plusieurs variétés allotropiques de soufre :

- Le soufre : octaédrique, rhomboédrique ; sa masse volumique vaut 2060 kg.m^{-3} .
- Le soufre : clinorhombique, en aiguilles ; sa masse volumique vaut 1960 kg.m^{-3} .



L'équilibre entre le S_α et le S_β est pratiquement athermique ; son enthalpie vaut 0,38 kJ/mol. C'est un équilibre monovariant. Comme l'enthalpie est positive, la forme est stable à température élevée. Du soufre, dissous dans le sulfure de carbone CS_2 , après évaporation de celui-ci, cristallise en octaèdres jaunes : S_α ; mais du soufre fondu et refroidi lentement cristallise tout d'abord sous forme d'aiguilles brunes.

Par chauffage lent, la température de transition de S_α en S_β est de $95,5^\circ C$ sous 1 bar. La température de fusion de la forme est $119^\circ C$. Mais la transformation en est très lente, et, si l'on élève rapidement la température, le soufre n'a pas le temps de se transformer en soufre β et fond à $112,8^\circ C$ sous 1 bar.

A $119^\circ C$, le soufre est un liquide jaune clair très mobile. Sa viscosité va encore diminuer si l'on chauffe jusqu'à $155^\circ C$. C'est le soufre λ formé, comme les deux phases solides précédentes de molécules S_8 cycliques :

Si la température dépasse $160^\circ C$, le liquide devient de plus en plus visqueux et noircit. Le maximum de viscosité est atteint à $190^\circ C$.

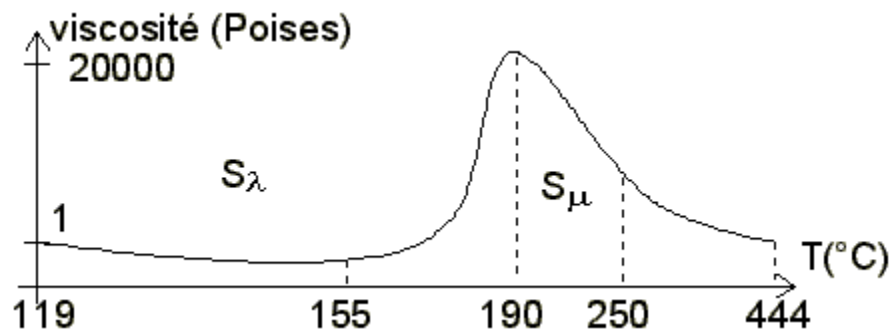


Figure 5 : Viscosité de soufre en fonction de la température.

I.1.3 Importation du soufre solide

Le soufre solide est importé soit naturel de la Pologne et l'Ukraine soit artificiel de l'Arabie Saoudite, États-Unis et Kuwait.

I.2 Aperçu général sur l'acide sulfurique

L'acide sulfurique, appelé aussi huile de vitriol ou vitriol, est un composé chimique toxique de formule H_2SO_4 , miscible avec l'eau en toutes proportions. C'est un produit industriel de première importance et trouve de très nombreuses applications.



I.2.1 Utilisation de l'acide sulfurique

Parmi les utilisations de l'acide sulfurique, on peut citer :

- Fabrication de l'acide phosphorique par attaque du phosphate de calcium ;
- Fabrication des engrais tels que les superphosphates, le sulfate d'ammonium ;
- Industrie des textiles artificiels ;
- Traitement des minerais ;
- Synthèse de composés chimiques (colorants, explosifs, détergents, divers sels, autres acides...) ;
- Raffinage du pétrole ;
- Batteries au plomb (H_2SO_4 est alors connu sous le nom d'« acide de batterie ») ;
- Industrie du traitement de surface des matériaux etc.

I.2.2 Propriétés Physicochimiques

Les propriétés physico-chimiques et thermodynamiques de l'acide sulfurique sont consignées dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Propriétés physico-chimiques de l'acide sulfurique.

Formule brute	H_2SO_4
Masse molaire (g/mol)	98,078
pK _a	-3,0 et 1,9
Moment dipolaire (D)	2,72
Diamètre moléculaire (nm)	0,487
T° fusion (°C)	100% : 10,31 98% : 3 93% : -32 78% : -38 74% : -44 65% : -64
T° ébullition (°C)	340
Solubilité	Miscible avec l'eau et l'alcool (réaction exothermique)
Masse volumique (g/cm ³)	1,8302
S ⁰ liquide, 1 bar (J/mol K)	19



$\Delta_f H^0_{\text{liquide}}$ (kJ/mol)	-814
--	------

I.2.3 Informations toxicologiques

• **Explosion** : l'acide sulfurique est un composé explosif, cependant il réagit vivement avec de nombreuses matières organiques, métaux en poudre, carbures, chlorates, chromates, permanganates et nitrates, en produisant une très grande quantité de chaleur et un dégagement d'hydrogène. Une réaction violente et dangereuse se produit si l'acide sulfurique concentré entre en contact avec de l'eau. La réaction est accompagnée de projection de liquide. L'acide sulfurique concentré réagit violemment avec les bases fortes anhydres ou en solutions concentrées.

• **Toxicité** : l'acide sulfurique est susceptible d'être faiblement absorbé par les voies respiratoires et digestives, après réaction violente avec l'eau. En solution et en aérosol, il est corrosif et irritant pour la peau, les yeux, les voies respiratoires et digestives. Les risques pour l'homme et l'environnement sont donc surtout dus au caractère corrosif de l'acide sulfurique en cas de contact. Un contact répété ou prolongé avec la peau peut causer une dermatite.

I.2.4 Fabrication industrielle

La préparation industrielle de l'acide sulfurique se fait selon deux procédés : procédé des chambres de plomb et procédé de contact. Ce dernier est le plus largement mis en œuvre, car il requiert le contact avec un catalyseur et passe par les trois étapes suivantes :

- ☞ La première consiste à la purification et la combustion du soufre à l'air sec afin d'obtenir du dioxyde de soufre SO_2 ;
- ☞ La seconde est une oxydation du dioxyde de soufre en trioxyde de soufre SO_3 à l'aide de pentoxyde de divanadium V_2O_5 ;
- ☞ Et enfin, la dernière étape est une absorption de l'anhydride sulfurique.

II. Principe de fabrication de l'acide sulfurique

L'atelier sulfurique du Maroc Phosphore II ayant pour objectif la fabrication de H_2SO_4 . Il comprend trois unités identiques de fabrication de l'acide sulfurique, d'une capacité unitaire



journalière de 1750 tonnes. Chaque unité se distingue par les appellations suivantes : ligne A, ligne B et ligne C.

L'acide sulfurique est produit selon le procédé MONSANTO (simple absorption) en utilisant le soufre à l'état liquide et l'air de combustion.

L'acide sulfurique est obtenu selon les réactions chimiques suivantes :

A/ Combustion du soufre en présence de l'air sec pour former l'anhydride sulfureux :



B/ Conversion de l'anhydride sulfureux en anhydride sulfurique :



C/ Absorption de l'anhydride sulfurique par de l'acide sulfurique concentré à 98-99 % et addition de l'eau pour obtenir une solution contenant environ 98.5 % d'acide sulfurique :



III. Description des équipements

III.1 Turbosoufflante

La turbosoufflante est un compresseur d'air centrifuge entraîné par une turbine à vapeur HP. Elle a pour but d'aspirer l'air atmosphérique et de l'envoyer vers la tour de séchage. La turbosoufflante aspire l'air ambiant à travers des filtres pour le débarrasser de la poussière qu'il contient, cet air aspiré traverse également un silencieux sous forme d'une chambre équipée de blocs en laine de verre. Elle est constituée de :

- Une turbine à vapeur qui transforme l'énergie thermique en énergie mécanique ; et qui est alimentée par la vapeur haute pression HP ;
- Un réducteur de vitesse qui sert à réduire la vitesse de rotation et à transmettre le mouvement à la soufflante ;
- Une soufflante sous forme d'un ventilateur qui aspire l'air ambiant et le refoule vers la tour de séchage.

L'ensemble de ces éléments nécessite un système de graissage et de refroidissement continu constitué par :

- Un réservoir d'huile contenant une résistante électrique pour chauffage.
- Deux pompes assurant la circulation de l'huile (la pompe principale en marche et la turbopompe maintenue en réserve qui fonctionne en vapeur HP), la 3^{ème} pompe réserve à courant continu,
- Deux filtres d'huile,
- Un accumulateur d'azote,
- Deux refroidisseurs d'huile.

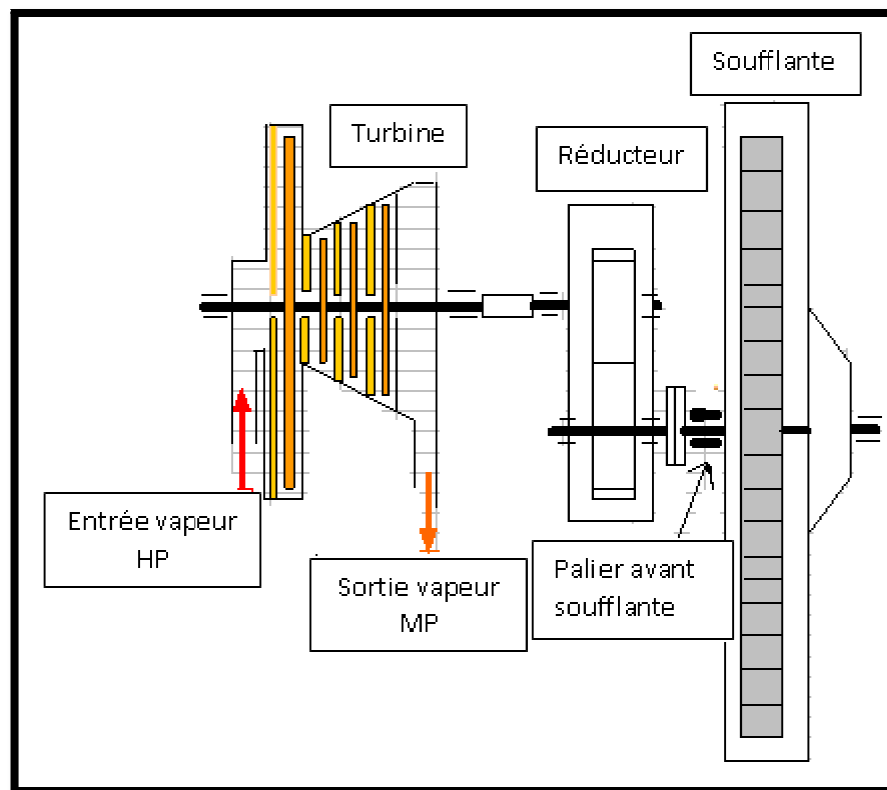


Figure 6 : Schéma de la turbosoufflante

III.2 Tour de séchage

La tour de séchage est une tour verticale cylindrique en acier zéro corrosion « ZeCor » (à l'exception de linge B qui est en acier au carbone) à fond bombé. La partie supérieure est équipée de bougies qui servent à empêcher les gouttes d'acide entraînées par le courant d'air. L'intérieur de la tour est constitué par les éléments suivants :



- ✓ Piliers de support en briques antiacide au nombre de soixante;
- ✓ Anneaux Raschig ;
- ✓ Rigoles d'arrosage en fonte et en acier antiacide ;
- ✓ Canaux d'arrosage montés dans le fond des rigoles et déversent sur la couche d'anneaux ;
- ✓ Un remplissage en selles intalox céramiques installées sur une grille en inox.

Le système d'arrosage se compose de distributeur d'acide qui est alimenté par un collecteur et des rigoles permettant la distribution d'acide sur toute la surface du garnissage.

La tour de séchage est alimentée par l'air de la turbosoufflante à contre courant avec l'acide sulfurique 98,5% à une température de 55°C. À la partie supérieure de la tour on obtient d'air sec, et dans la partie inférieure on aura de l'acide sulfurique dilué qui se dirige vers le bac de circulation.

III.3 Fosse à soufre

La fosse à soufre est construite en béton, avec un couvercle en acier. Elle est équipée de deux réchauffeurs cylindriques et un troisième de forme rectangulaire alimentés avec de la vapeur saturée à 4.5 bars et à une température de 140°C pour maintenir le soufre à l'état liquide.

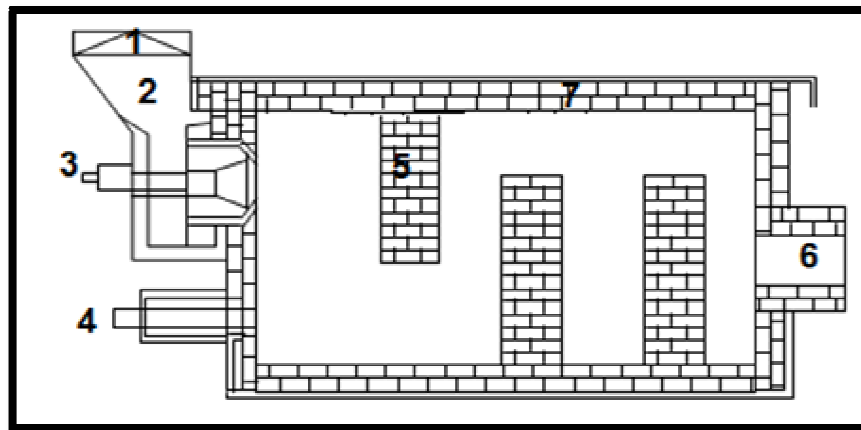
Quatre pompes d'alimentation de soufre sont installées dans la fosse, trois pompes sont opérationnelles, la quatrième étant de réserve.

III.4 Four ou chambre de combustion

Le four à soufre est une chambre horizontale en acier, avec un revêtement intérieur de briques réfractaires et une couche de briques isolantes.

Le four contient trois chicanes internes construites en briques, dont deux sont positionnées en bas de la chambre pour augmenter le temps de séjour du gaz dans le four. Il est aussi équipé de cinq brûleurs pour la pulvérisation du soufre liquide. Les buses des cannes sont creuses et de forme conique. Le contrôle de la température à l'intérieur du four se fait par l'intermédiaire de deux thermocouples.

Le four est équipé aussi d'un brûleur de mise en marche au gasoil avec un pilote au propane installé à l'intérieur du four à soufre et permet de préchauffer le filtre à gaz chaud ainsi que les masses catalytiques du convertisseur avant le démarrage de l'usine.



1 : Entrée d'air 2 : Boîte à vent 3 : Brûleur à soufre
4 : Brûleur à gazoil 5 : Chicane 6 : Sortie des gaz
7 : Brique réfractaire anti acide

Figure 7 : Schéma du four de combustion.

III.5 Chaudière de récupération / ballon

Le volume du gaz nécessaire au procédé doit contenir entre 8.5 et 10 % en volume de SO_2 , et doit être refroidi avant son admission dans la première masse du convertisseur. Ainsi les 95 % du débit total du gaz de combustion sont refroidis jusqu'à la température de $360\text{ }^\circ\text{C}$ dans la chaudière de récupération où est générée de la vapeur saturée à 58 bars. Cette chaudière est de type à tubes de fumée et à circulation naturelle. Elle est constituée par :

- Un corps cylindrique horizontal à tubes de fumée.
- Un ballon de vapeur en charge.
- Un tube de barbotage permettant la mise en pression de la chaudière.
- Un système de contrôle de niveau d'eau dans le ballon, qui compte :
 - Un régulateur de niveau.
 - Une alarme de niveau très haut et très bas.
 - Un niveau à glace.
 - Deux soupapes de sécurité.
 - Un purgeur d'extraction.
 - Un purgeur continu.

III.6 Filtre à gaz chaud

Le filtre à gaz chaud a pour but d'éliminer les cendres et les poussières contenues dans le gaz sortant de la chaudière, qui va être envoyé au convertisseur afin d'éviter l'encrassement des couches des masses catalytiques.

Le filtre représente sous forme d'un cylindre vertical et élaboré en tôle d'acier. Il est constitué d'un récipient cylindrique contenant deux lits de chamotte séparés par une plaque et placés sur des grilles en fonte supportées par des colonnettes en fonte. Chacun des lits est composé des éléments suivants :

- Une 1^{ère} couche de galets en quartz,
- Une couche de chamotte,
- Une 2^{ème} couche de galets en quartz.

Les gaz provenant de la chaudière traversent les chambres remplies de la chamotte. Il est noter que la chamotte est une matière caractérisée par sa résistance à la chaleur, cette dernière constitue une surface filtrante permettant de capter les cendres et les impuretés résultant de la combustion.

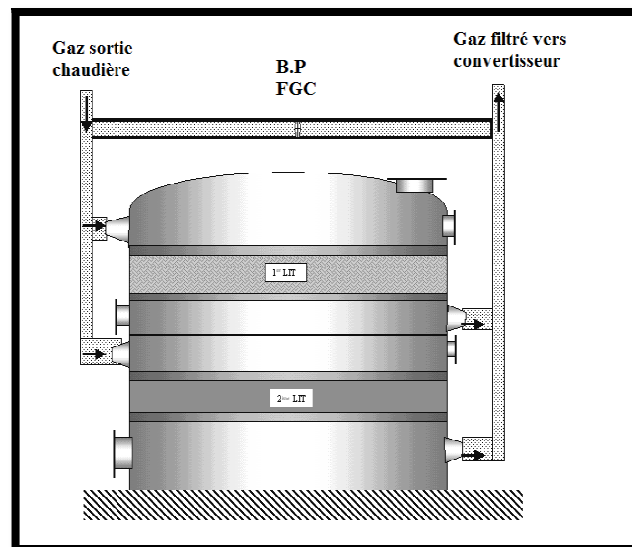


Figure 8 : schéma du filtre à gaz chaud.

III.7 Convertisseur

Le convertisseur catalytique est une technologie de la firme «MONSANTO Enviro-Chem » à quatre passes. Il est sous forme d'un cylindre vertical équipé d'une enveloppe en tôle d'acier, et dont la paroi de l'enveloppe est revêtue en briques réfractaires anti-acide. La tubulure d'amenée des

gaz de convertisseur se termine par un diffuseur permettant de répartir les gaz sur toute la surface de la couche catalytique.

Tableau 2 : Répartition du catalyseur dans le convertisseur.

Masses catalytiques	Type de vanadium	Volume (dm ³)
1 ^{ère} masse	XLP 120	74 100
2 ^{ème} masse	XLP 120	80 500
3 ^{ème} masse	XLP 110	97 400
4 ^{ème} masse	XLP 110	108 000

Le tableau ci-dessus définit le profil de chaque masse catalytique, et montre notamment :

- qu'en dessus et en dessous de chaque masse catalytique, est disposée une couche de galets de quartz avec une épaisseur de 50 mm (de granulométrie 20 à 30 mm)
- que les thermocouples servant à mesurer la température à l'entrée et à la sortie des masses sont disposés à l'interface galets/catalyseur. La mise en place correcte de ces thermocouples est extrêmement importante puisque les indications de température permettent le réglage et l'optimisation de la conversion.

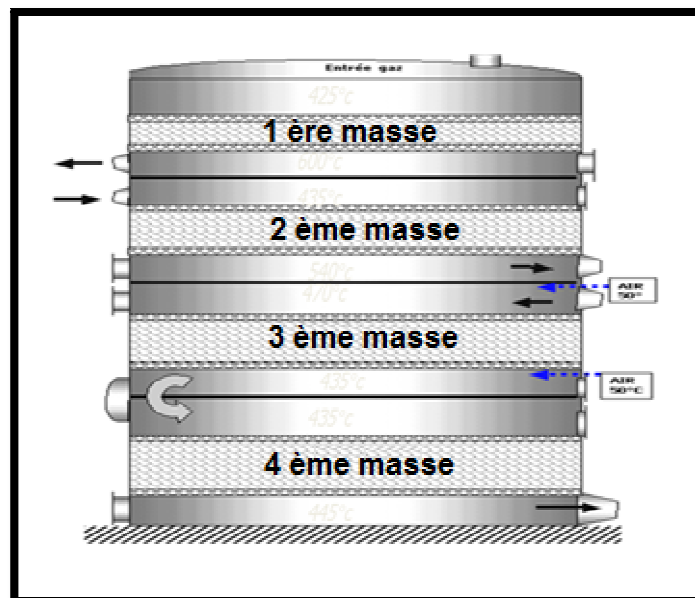


Figure 9 : Schéma du convertisseur.

III.8 Economiseur

L'économiseur vertical est conçu pour refroidir le gaz SO_3 à 190°C . La surface du transfert de la chaleur est constituée de tubes d'acier au carbone sans soudure avec des ailettes en acier au carbone soudées en continu. L'économiseur est muni également d'un by-pass et d'une vanne à trois voies pour assurer la température optimale de conversion et la température d'alimentation normale du ballon de la chaudière. L'économiseur porte dans sa partie inférieure un pot de garde hydraulique destiné à accumuler les condensats pour pouvoir détecter les fuites. Pour l'entretien de l'économiseur et afin de faciliter son entretien, il est muni de trous d'homme.

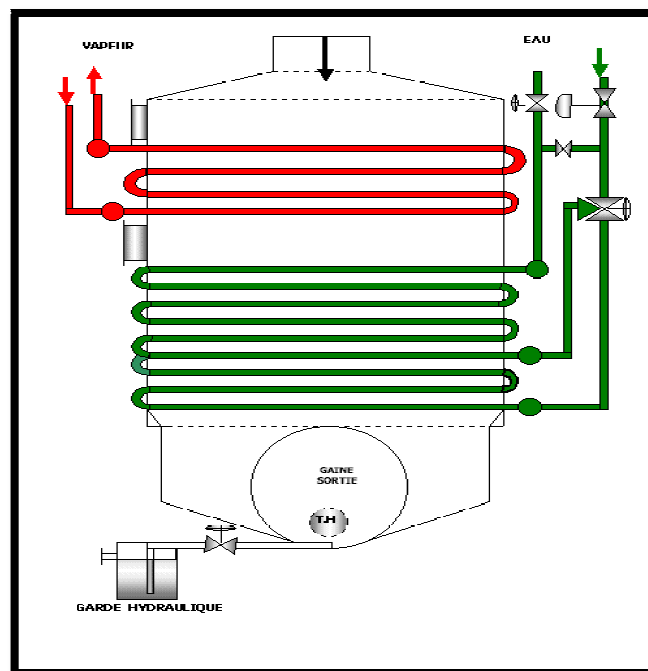


Figure 10: Schéma de l'économiseur.

III.9 Surchauffeurs I et II

Les surchauffeurs de vapeur sont des échangeurs gaz-vapeur protégés par une cage en acier inoxydable. Ils récupèrent les calories des gaz sortant de la 1^{ère} et la 2^{ème} masse catalytique du convertisseur. La surface du transfert de la chaleur est constituée des tubes en ailettes en alliage.

Un dispositif de by-pass de la vapeur externe aux surchauffeurs permet d'ajuster la température d'entrée des gaz sur la deuxième et la troisième masse du catalyseur.

III.10 Tour d'absorption

La tour d'absorption est l'instrument où se fait l'absorption de SO_3 par l'eau présente dans l'acide sulfurique à 98.5% afin d'éviter le phénomène de brouillard résultant du contact direct de l'eau et de l'acide sulfurique. La tour d'absorption TA est de forme cylindrique verticale en acier zéro corrosion « ZeCor ». La partie supérieure est équipée par des "Brinks" servant à empêcher les vésicules d'acide entraînées par le courant gazeux. L'intérieur de la tour est constitué des éléments suivants :

- ✓ Piliers de support en brique antiacide au nombre de soixante,
- ✓ Anneaux Raschig,
- ✓ Rigoles d'arrosage en fonte et en acier antiacide,
- ✓ Canaux d'arrosage montés dans le fond des rigoles et déversent sur la couche des anneaux,
- ✓ Un remplissage en selle en céramique est installé sur les grilles.

Le système d'arrosage se compose de distributeur d'acide qui est alimenté par un collecteur et des rigoles permettant la distribution d'acide sur toute la surface du garnissage.

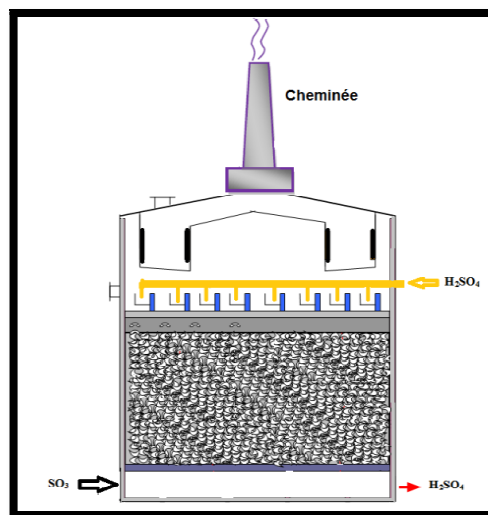


Figure 11 : Schéma de la tour d'absorption.

La cheminée d'évacuation des gaz du procédé à l'atmosphère est construite en acier au carbone. Des plates-formes et des points d'échantillonnage y sont installés pour conduire les analyses d'émissions de l'usine.



III.11 Refroidisseurs tubulaires

Quatre refroidisseurs tubulaires en forme de cylindres disposés horizontalement, munis de faisceaux tubulaires destinés au refroidissement de l'acide des tours de séchage et d'absorption.

A l'intérieur des tubes circule l'eau de mer et l'acide circule côté calandre. Ces fluides sont véhiculés à courant parallèle pour les refroidisseurs de l'acide de la tour d'absorption, et à contre-courant pour les refroidisseurs de l'acide de séchage, et l'acide produit. Ces refroidisseurs sont protégés contre la corrosion par un dispositif de protection anodique "Film Gard". Un système de sécurité et de contrôle avec des alarmes est prévu à cet effet.

III.12 Bacs de stockage de l'acide sulfurique

Deux bacs de stockage de l'acide sulfurique d'une capacité unitaire de 15.000 t. L'évent du bac est muni d'un sécheur d'air à arrosage d'acide en continu afin d'éviter la corrosion possible par l'humidité atmosphérique qui provoque une dilution locale de l'acide. Les sorties des bacs sont équipées de vannes de sécurité.

Quatre pompes sont installées pour aspirer l'acide des bacs et le refouler vers l'atelier phosphorique. Ces pompes sont reliées par un collecteur d'aspiration et un collecteur de refoulement.

Chaque pompe est munie d'une tubulure de recyclage de l'acide vers les bacs de stockage, permettant d'éviter aux pompes de ne pas fonctionner en dessous du minimum technique en cas d'arrêt de l'expédition.

IV. Description du procédé de fabrication de l'acide sulfurique

Dans le procédé de fabrication de l'acide sulfurique on trouve trois circuits : circuit de gaz, circuit d'acide et circuit eau-vapeur.

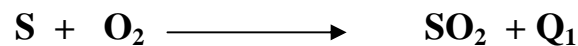
IV.1 Circuit de gaz

Le soufre liquide est stocké dans les bacs de stockage, puis acheminé par gravité, à travers une vanne, dans la fosse à soufre où trois réchauffeurs le gardent en état liquide. L'alimentation de la fosse est contrôlée par une boucle de régulation. Quatre pompes, dont une est en réserve,



refoulent le soufre liquide à brûler dans le four de chaque ligne. Ce soufre est pompé à 12 bars vers les cinq atomiseurs du four, qui le pulvérisent dans la chambre de combustion pour obtenir du SO₂ gazeux. L'oxygène est contenu dans l'air soufflé à travers la boîte à vent de la turbosoufflante. Il est à noter qu'en amont des brûleurs, des vannes d'isolement sont présentes et sont utilisés pour le réglage du débit de soufre à brûler.

Dans le four, la combustion se fait selon la réaction chimique suivante :

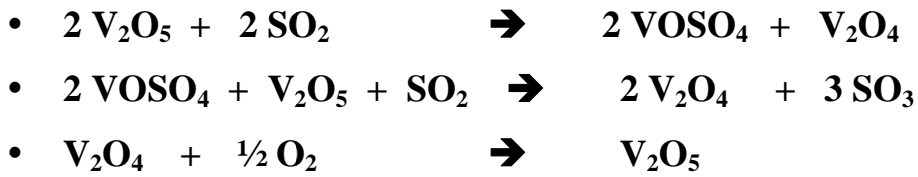


Cette masse gazeuse traverse la chaudière de récupération, où elle cède de l'énergie à l'eau alimentaire circulant dans son calandre. Les gaz quittent la chaudière avec une température de 380°C, mais le by-pass fait passer du gaz chaud pour élever cette température à 447°C (en amont du filtre). Après, le gaz entre dans le filtre à gaz chaud qui contient deux masses de gravions, le gaz se répartit sur ces deux lits avant de se rassembler à l'entrée de la 1^{ère} masse du vanadium V₂O₅ où la température enregistrée est de 420°C à l'entrée et de 620°C à la sortie. Les gaz doivent être refroidis pour améliorer le rendement de l'oxydation du SO₂ dans la prochaine masse du catalyseur.

Le gaz SO₃ qui accompagne les SO₂ non encore convertis, circule vers le surchauffeur I où ils se refroidissent par échange de chaleur avec la vapeur haute pression. La température des gaz à l'entrée de la seconde masse est ajustée en by passant une partie du débit de vapeur HP autour du surchauffeur. Les gaz refroidis circulent du surchauffeur I vers la seconde masse du convertisseur, et entrent à une température de 440°C pour favoriser une conversion supplémentaire du SO₂ en SO₃ accompagnée d'un nouveau dégagement de chaleur. Le gaz converti sort de cette masse catalytique avec une température de 520°C qu'il perd dans la deuxième surchauffeur (II). Suite à l'échange thermique avec la vapeur provenant de l'économiseur et la dilution par l'air sec à la sortie de 2^{ème} masse, le gaz refroidi circule et rentre à la 3^{ème} masse de vanadium avec une température de 435°C. Notons ici que le gaz chaud traverse l'échangeur gaz/gaz chaud par les tubes.

La température du gaz à la sortie de la 3^{ème} masse est de 470°C, le refroidissement des gaz dans cette étape se fait par l'injection de l'air sec à la sortie de la 3^{ème} masse où la température baisse jusqu'à environ 430 °C ; le gaz refroidi pénètre directement dans la 4^{ème} masse où le taux de conversion atteint 98%.

Les réactions de conversion se déroulent selon les équations suivantes :



A la sortie du convertisseur, on aura des gaz SO_3 avec une température d'environ 440°C qui seront dirigés vers l'économiseur, ce dernier a pour rôle de ramener les gaz SO_3 à une température favorable à l'absorption par échange thermique avec la vapeur provenant du ballon et avec l'eau d'alimentation de la chaudière. Les gaz SO_3 quittent l'économiseur avec une température de 190°C .

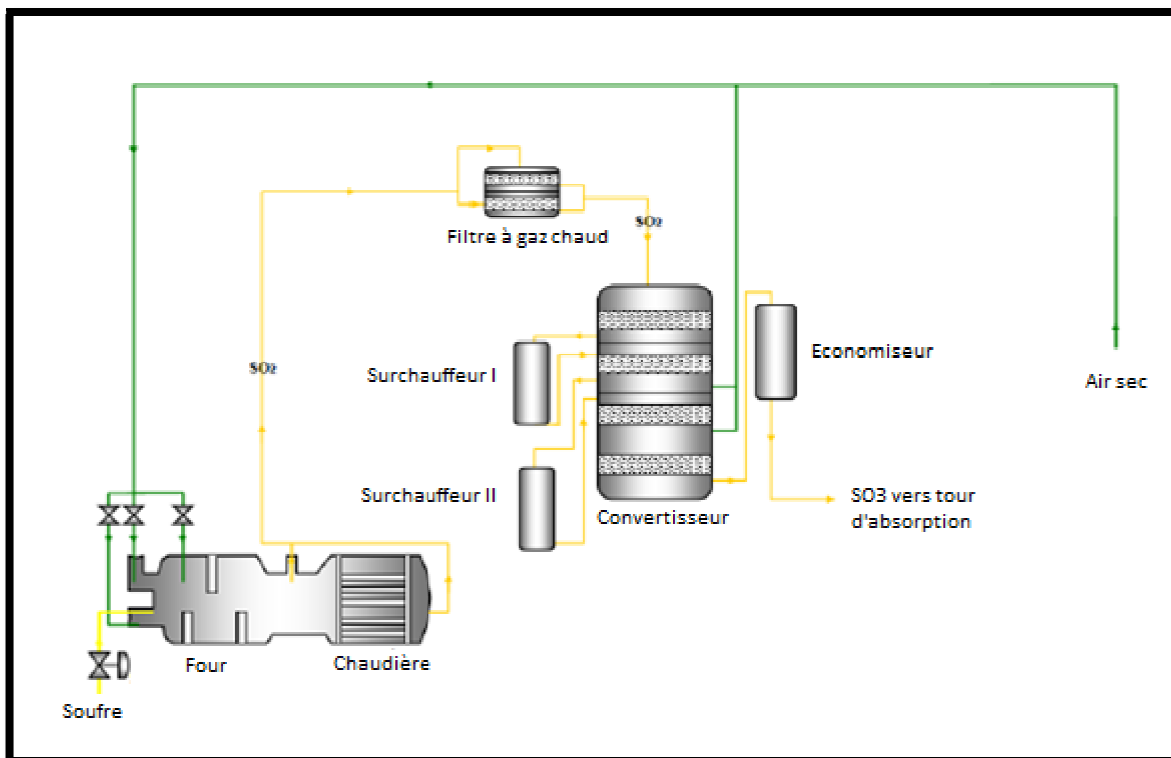
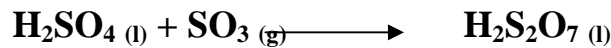


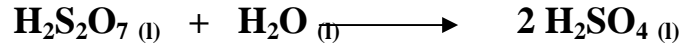
Figure12 : Schéma de Circuit de gaz

IV.2 Circuit d'acide

Le gaz SO_3 provenant de l'économiseur est recueilli dans la tour d'absorption est dissout dans la solution d'acide de circulation, du fait qu'il ne se combine pas avec de l'eau pure d'une manière satisfaisante afin de produire de l'oléum selon la réaction ci-après:



L'oléum est ensuite hydraté pour libérer de l'acide sulfurique selon l'équation suivante :



La solution d'acide sulfurique quittant la tour d'absorption est envoyée dans le bac de circulation, où elle se mélange avec une partie du retour de l'acide de la tour de séchage et avec de l'eau de dilution pour maintenir le titre d'acide.

L'acide produit est à 98.5% de pureté, s'écoule par gravité dans le bac de circulation par l'intermédiaire d'une tuyauterie munie d'un siphon équipant chacune des deux tours. Cet acide est repris par les pompes verticales émergées refoulant dans le même collecteur, pour être recyclé en tête des tours de séchage et d'absorption, après avoir transité par les refroidisseurs tubulaires d'acide de séchage et d'absorption.

L'acide sulfurique concentré correspondant à la production est prélevé sur le collecteur d'alimentation de la tour de séchage pour être dirigé vers le refroidisseur tubulaire d'acide produit, où il est refroidi à une température correcte pour être stocké (température inférieure à 45 °C). L'acide est alors acheminé vers les réservoirs de stockage.

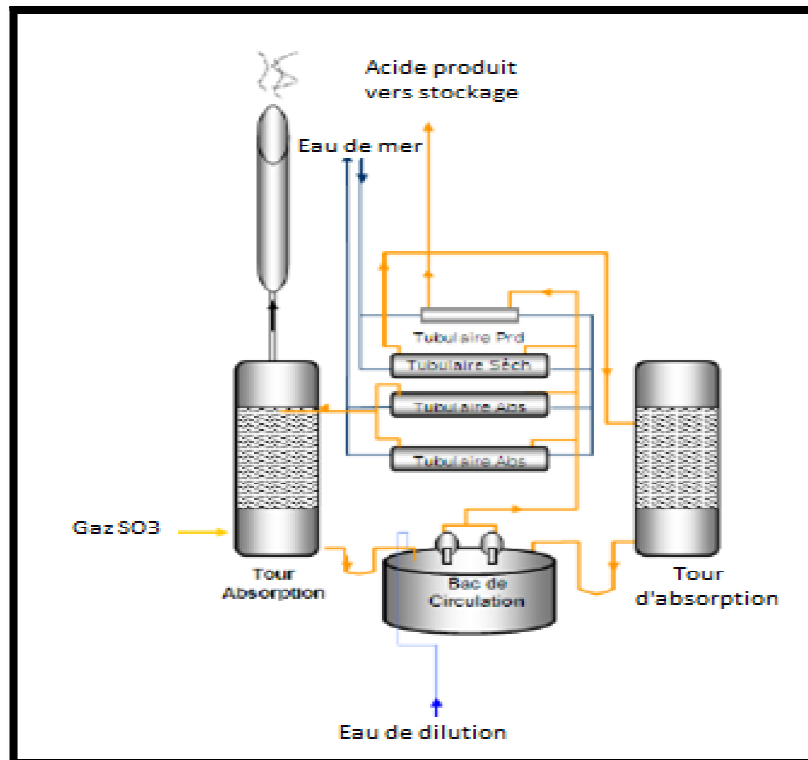




Figure13 : Schéma du circuit d'acide.

IV.3 Circuit eau – vapeur

L'eau alimentaire provenant de la centrale entre dans les tubes de l'économiseur en se caractérisant par la température de 120°C. Elle sera réchauffée après échange thermique avec le gaz qui traverse l'économiseur et qui provient de la 4^{ème} masse catalytique, puis envoyée vers le ballon de la chaudière avec une température de 275°C où se transforme en vapeur saturée.

Dans la chaudière, l'eau est accueillie dans le ballon avec un niveau d'environ 72 % d'eau. Six conduites latérales amènent l'eau dans la calandre de la chaudière où la vapeur revient au ballon par trois passages.

La vapeur sortant du ballon de la chaudière alimente le surchauffeur de l'économiseur où elle est chauffée par échange de chaleur avec le gaz issu de la 4^{ème} masse du convertisseur. Après, elle passe dans le surchauffeur II où elle échange de la chaleur avec les gaz sortant de la 2^{ème} masse du convertisseur. La vapeur quitte le surchauffeur II vers la surchauffeur I, au niveau duquel elle capte le maximum de chaleur avec les gaz sortant de la 1^{ère} masse du convertisseur.

La vapeur surchauffée doit être une vapeur haute pression (HP) conforme dont la température est de l'ordre de 490°C et la pression est de 58 bars. Une partie de cette vapeur est acheminée vers la turbine et l'autre partie vers la centrale thermoélectrique.

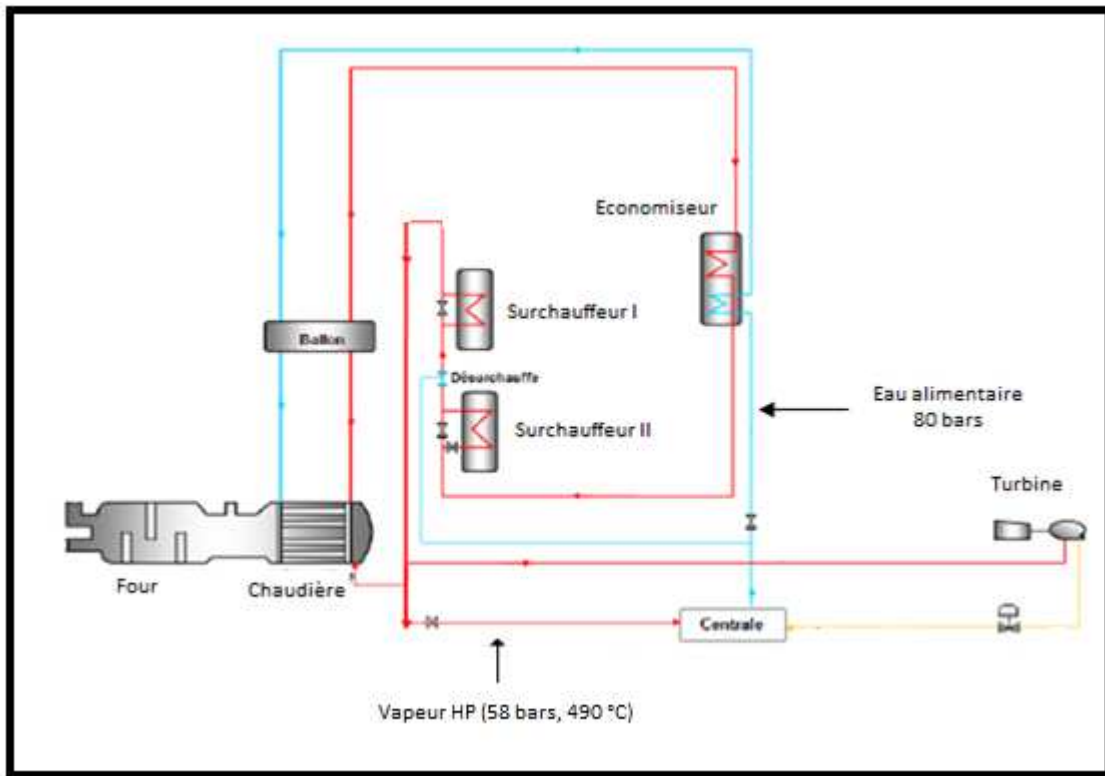


Figure 14 : Schéma de circuit eau-vapeur.

Objectifs :

L'objectif de cette partie consiste à :

- Identifier, analyser les causes puis étudier l'impact de la perte en vitesse sur les performances de l'atelier sulfurique et ce dont le but de réduire



cette perte. Pour atteindre cet objectif, notre travail a été mené selon la méthodologie suivante :

- Positionnement du problème ;
 - Recensement des causes ;
 - Analyse des causes ;
 - Impact de la perte en vitesse en termes de tonnage Produit;
 - Proposition et analyse des solutions pertinentes.
- Contrôler la performance des équipements dans l'atelier sulfurique par l'étude du bilan matière.

A. Etude de l'impact de la perte en vitesse sur les performances de l'atelier de production de l'acide sulfurique

Introduction

Dans toutes les industries, de nombreux problèmes imprévus apparaissent. Nombre d'entre eux sont des problèmes répétitifs. Le bon mode de gestion de ces problèmes est un indicateur pertinent de la maturité.



En effet, l'atelier sulfurique du Maroc phosphore II à Safi ne fait pas l'exception, car on était confronté à divers problèmes entre autres la perte de vitesse qui est considérée comme un défi majeur.

Pour étudier ce problème, nous avons opté pour une démarche méthodologique simple et efficace : c'est la méthode de résolution des problèmes « MRP ». Cette méthode peut permettre de résoudre un problème tout en s'attaquant aux causes dites racines. Ce modèle s'articule autour de quatre étapes et ne permet pas de passer directement de la perception du problème à la solution. Le tableau 3 présente les démarches à suivre pour l'application de la méthode MRP.

Tableau 3 : Les étapes du déroulement de la méthode MRP.

Etapes	Définitions
1 poser le problème	<ul style="list-style-type: none">- Identifier le problème,- Formaliser le problème (QOOQCP), ce qui signifie QUOI ? QUI ? OU ? QUAND ? COMMENT ? POURQUOI ?- Définir l'objectif. <p>Cette étape est constituée de quatre phases :</p> <ul style="list-style-type: none">- Rechercher les causes
2 Trouver les causes racines	<ul style="list-style-type: none">- Visualiser les causes (Diagramme d'Ishikawa),- Hiérarchiser les causes ;- Valider les causes principales (Diagramme de Pareto).
3 Choisir des solutions optimales	<ul style="list-style-type: none">- Sélectionner les solutions (analyse multicritères).
4 Mettre en œuvre la solution retenue et contrôler	<ul style="list-style-type: none">- Rédiger un plan d'action, et réaliser les actions définies.- mesurer les résultats des solutions mises en place et les comparer à la situation initiale.

I. Positionnement du problème

La perte de vitesse est une limitation de production au niveau d'un processus, à titre d'exemple, l'atelier de production de l'acide sulfurique de Maroc phosphore II. Elle engendre un



manque en production considérable de l'acide sulfurique (H_2SO_4) et en vapeur haute pression (HP) dans chacune des trois unités de production A, B et C.

Ces conséquences nous ont conduits à remettre en cause plusieurs facteurs comme la gestion interne de la division en général l'atelier, la planification de production avec d'autres services, les performances des équipements ainsi que la qualité de la matière première.

Or, les questions qui se posent avec force sont les suivantes :

- Quelles sont les causes principales de cette perte ?
- Quel est l'impact de cette perte sur les performances de l'atelier ?
- Existe-t-il des solutions pertinentes pour réduire les répercussions de cette perte au niveau de la production ?

Avant de prétendre répondre à ces questions, nous allons procéder d'abord par recenser les causes qui favorisent la limitation de production. Pour ce faire, nous nous référons aux rapports journaliers rédigés par les chefs d'équipes.

II. Recensement des causes

En se basant sur les rapports journaliers des trois lignes durant toute une année (du 01/03/2011 au 29/02/2012), nous avons dressé un tableau regroupant les données suivantes (voir annexes) :

- Les dates quand la réduction de vitesse s'est manifestée;
- La durée de réduction de vitesse ;
- La cadence durant cette réduction ;
- La perte de vitesse en pourcentage et l'équivalent en perte P_2O_5 ;
- La cause de limitation de vitesse.

Après recensement, nous avons classé les causes par famille, afin de pouvoir calculer le total de manque à produire de l'acide sulfurique équivalent à chaque famille de cause, et par conséquent de déduire les pertes en production en P_2O_5 .

Après avoir pris connaissance sur la perte de vitesse et les causes potentiellement influentes, une méthode d'analyse du processus a été établie selon le diagramme d'ISHIKAWA. Dans ce dernier, sont regroupées les différentes causes possibles de réduction de vitesse.

III. Diagramme de causes à effet ou diagramme d'Ishikawa

Le diagramme causes à effet ou « diagramme d'ISHIKAWA » est une représentation graphique simple qui, pour un effet donné, on tente d'identifier toutes les causes possibles. Chaque grand groupe des causes (méthode des 5M) correspond à une branche du diagramme. La construction de ce diagramme passe par plusieurs phases :

- Identification de l'effet considéré ;
- Regroupement par famille des causes sous le vocable **5M** ; pour plus de précision (voir figure 12) :

- **Matériel** : c'est tout investissement sujet à amortissement (machine, pièces de rechange,...).
- **Main d'œuvre** : personnel qualifié.
- **Matière** : c'est tout ce qui est consommable.
- **Méthode** : c'est tout ce qui est lié à la définition du processus de production (méthodes fiables,...).
- **Milieu** : environnement de travail (conditions de travail, ergonomie, sécurité, ...).

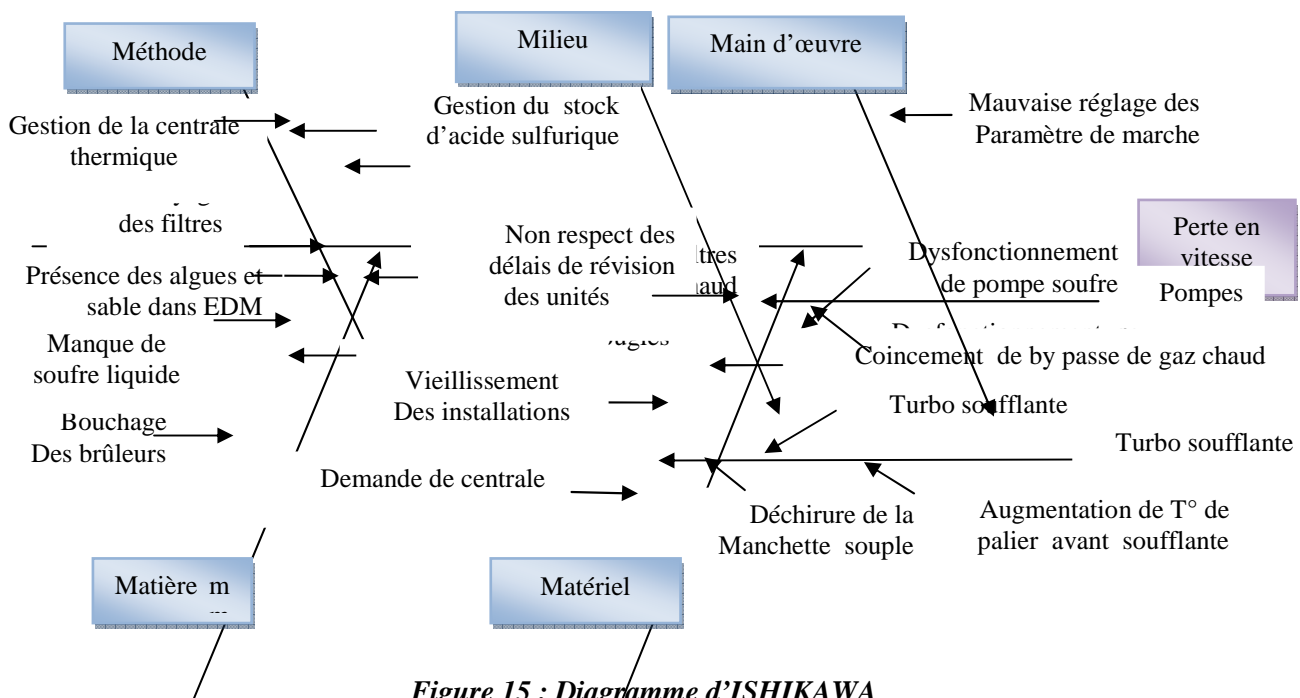


Figure 15 : Diagramme d'ISHIKAWA

IV. Analyse des causes principales des lignes A, B et C



Après avoir hiérarchisé les causes, nous avons opté pour celles qui sont les plus influentes. Ces dernières sont représentées sous forme de "diagramme de Pareto", permettant ainsi de visualiser l'importance relative des différentes causes d'un problème et de sélectionner celles qui sont prioritaires. L'objectif c'est de permettre d'afficher dans le temps l'évolution de l'impact des actions mises en place sur les causes du problème.

Pour tracer le diagramme de Pareto, il faut exploiter les résultats pour chacune des causes. Les résultats du manque à produire en tonne monohydrate (TMH) trouvés au niveau des lignes A, B et C sont calculés en multipliant la production journalière de chaque ligne (1750 tonne) par le pourcentage de la perte en vitesse selon la relation suivante :

$$\text{Le manque à produire (TMH)} = 1750 * \% \text{ de perte en vitesse}$$

IV.1 Analyse des causes de la ligne A

1. Résultats

Après calcul du manque à produire de l'acide sulfurique pour chaque famille des causes, nous avons regroupé les résultats dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Effet des causes sur la production de H₂SO₄ (ligne A)

Causes de ligne A	Manque à produire en TMH (H ₂ SO ₄)	Manque à produire en H ₂ SO ₄ (%)	Cumul de manque à produire TMH (%)
Engorgement du stockage de l'acide sulfurique	16 054	36,98	36,98
Demande de la centrale	15 383	35,43	72,41
Encrassement des filtres bougies	4 802	11,06	83,47
Augmentation du taux de SO ₂ cheminée	2 157	4,97	88,44
Bouchage des brûleurs	1 832	4,22	92,66
By passe de gaz chaud coincé	671	1,55	94,21
Manque du soufre	610	1,41	95,61
Vibration de palier de la TS	529	1,22	96,83
Encrassement des filtres d'huile	475	1,09	97,93
Augmentation de la température du palier avant soufflante	387	0,89	98,82
Vapeur HP non conforme	326	0,75	99,57
Déchirure de la manchette souple de turbosoufflante	188	0,43	100,00

2. Diagramme de Pareto

Le graphique suivant représente le manque et le cumul du manque à produire au niveau de l'acide sulfurique en fonction des causes identifiées.

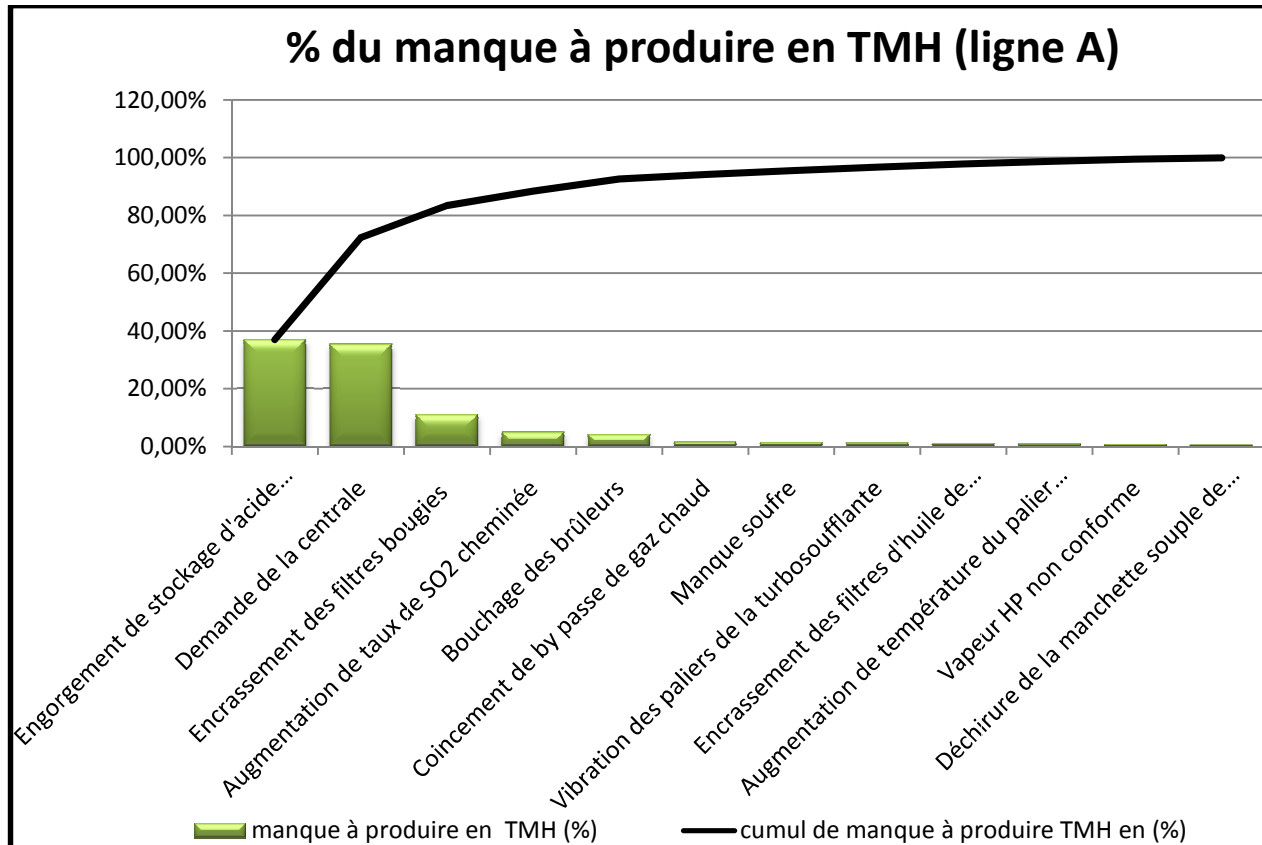


Figure 16 : Diagramme de Pareto de la ligne A.

Interprétation :

D'après la représentation des résultats sur le diagramme de Pareto, on constate que 80% des pertes de vitesse sont dues à trois causes principales et qu'il faudra agir en premier lieu :

- Engorgement de stockage d'acide sulfurique ;
- Demande de la centrale ;
- Encrassement des filtres bougies.

IV.2 Analyse des causes de la ligne B



1. Résultats

Les différentes causes qui influent sur la production de H_2SO_4 au niveau de la ligne B sont représentées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Effet des causes sur la production de H_2SO_4 (ligne B).

Causes	Manque à produire en TMH (H_2SO_4)	Manque à produire en H_2SO_4 (%)	Cumul de manque à produire H_2SO_4 (%)
Demande de la centrale	32 742,50	65,37	65,37
Engorgement de stockage acide sulfurique	7 630,00	15,23	80,61
Bouchage des brûleurs	3 237,50	6,46	87,07
Manque de soufre liquide	2 642,50	5,28	92,35
Encrassement filtre à gaz chaud	1 995,00	3,98	96,33
Encrassement des filtres bougies	840,00	1,68	98,01
Augmentation de taux de SO_2 cheminée	577,50	1,15	99,16
Bouchage de circuit soufre	262,50	0,52	99,69
Encrassement des filtres d'huile	122,50	0,24	99,93
Vapeur HP non conforme	35,00	0,07	100,00

2. Diagramme de Pareto

Afin de bien visualiser les causes principales mentionnées dans le tableau 5, les résultats trouvés sont illustrés selon le diagramme de Pareto.

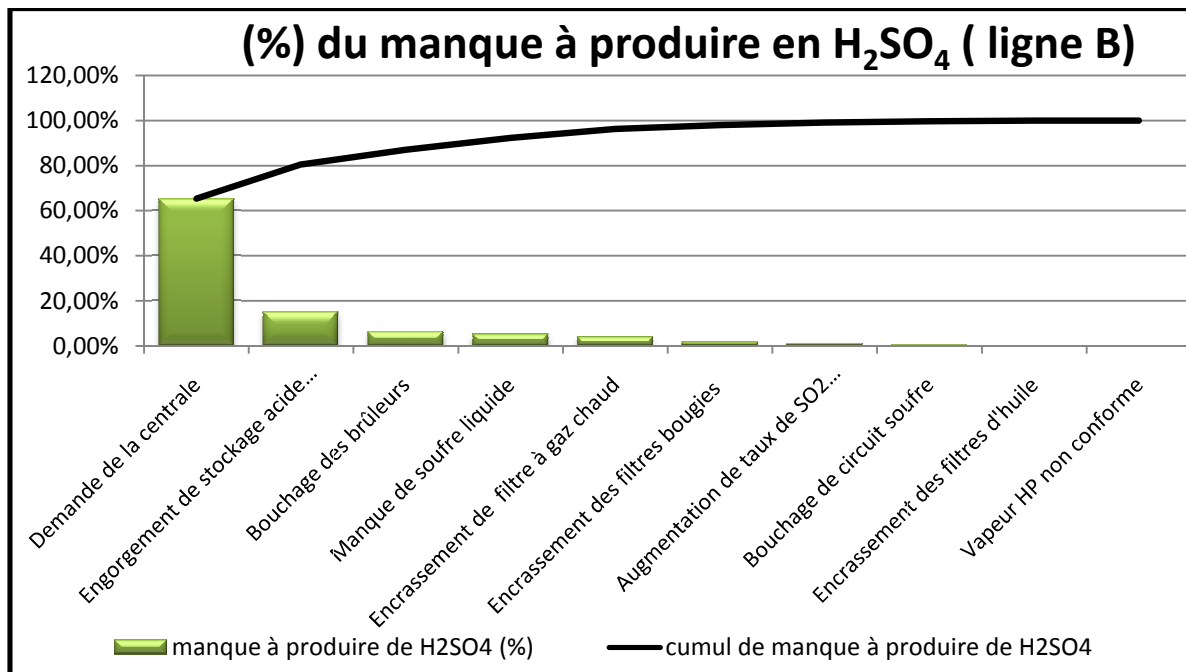


Figure 17 : Diagramme de Pareto de la ligne B

Interprétation :

A l'instar de l'analyse effectuée au niveau de la ligne A, le diagramme de Pareto ci-dessus nous a permis de localiser les trois causes principales responsables de la réduction de la vitesse dans la ligne B, à savoir :

- Demande de la centrale ;
- L'engorgement de stock d'acide sulfurique ;
- Et le bouchage des brûleurs.

V.3 Analyse des causes de la ligne C

1. Résultats

Par analogie avec les lignes A et B, et en suivant les mêmes démarches établies précédemment, nous présentons dans le tableau 6 les causes et leurs effets sur la diminution en production de l'acide sulfurique dans la ligne C.

Tableau 6 : Effet des causes sur la production de H₂SO₄ (ligne C)

Causes	Manque à produire en	Manque à produire en	Cumul de manque à produire en TMH
--------	----------------------	----------------------	-----------------------------------



	TMH (H ₂ SO ₄)	H ₂ SO ₄ (%)	(%)
Demande de la centrale	9380,00	27,56	27,56
Engorgement de stockage d'acide sulfurique	8925,25	26,22	53,78
Augmentation de la température du palier avant soufflante	5145,00	15,12	68,89
Bouchage des brûleurs	2292,50	6,74	75,63
Encrassement du filtre à gaz chaud	2152,50	6,32	81,95
Vibration du palier de turbosoufflante	1820,00	5,35	87,30
Manque de soufre liquide	1470,00	4,32	91,62
Pompe à soufre	1365,00	4,01	95,63
Encrassement des filtres bougies de TS	560,00	1,65	97,28
Bouchage des filtres d'EDM	542,50	1,59	98,87
Augmentation du taux de SO ₂ cheminée	332,50	0,98	99,85
Déchirure de la manchette souple de la turbine	52,50	0,15	100,00

IV.3.2 Diagramme de Pareto

Le pourcentage du manque en production au niveau de la ligne C est présenté par le diagramme de Pareto selon la figure 18.

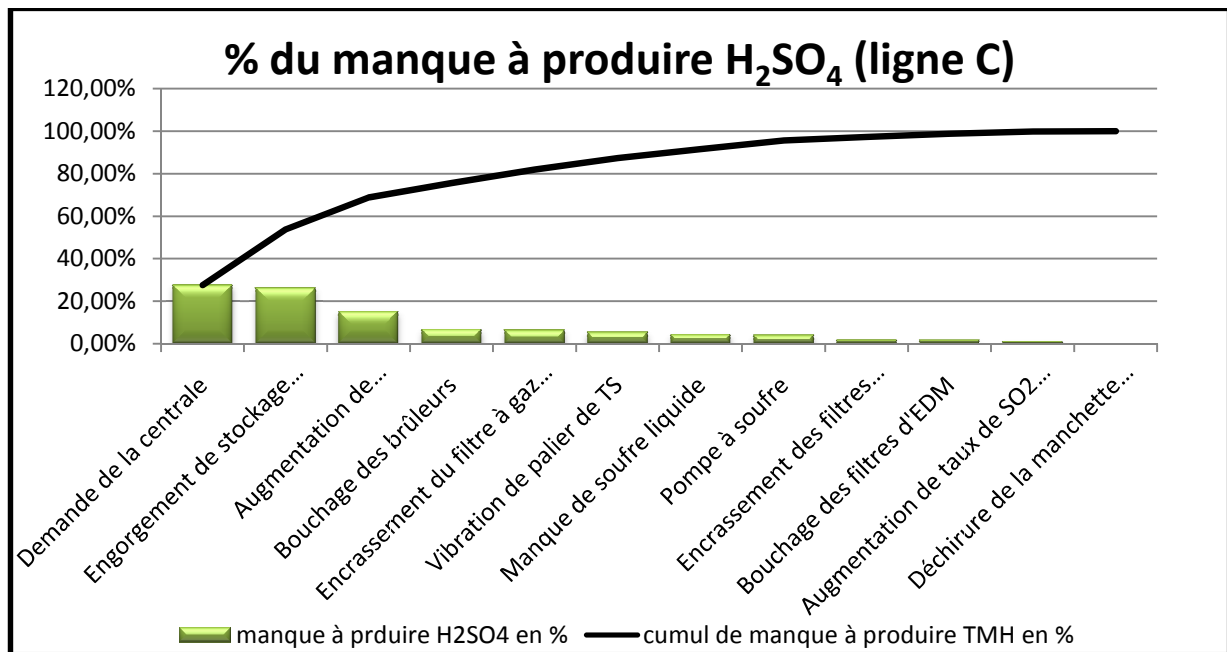


Figure 18 : Diagramme de Pareto de la ligne C.

Interprétation

Suite à l'analyse du diagramme de Pareto, on constate que les causes principales de perte de vitesse pour la ligne C sont :

- Demande de la centrale ;
- Engorgement de stockage acide ;
- Augmentation de température de palier avant turbosoufflante ;
- Bouchage des brûleurs ;
- Encrassement du filtre à gaz chaud.

Conclusion :

D'après l'analyse des causes des trois lignes, on trouve que les causes des problèmes sont essentiellement dues à la gestion de l'atelier et à la maintenance des équipements.

✓ Les causes dues à la gestion :

- Engorgement de stockage de l'acide sulfurique ;
- Demande de la centrale.



- ✓ Les causes dues aux équipements :
- Augmentation de température de palier avant soufflante ;
 - Bouchage des brûleurs ;
 - Encrassement du filtre à gaz chaud ;
 - Et l'encrassement des filtres bougies.

V. Origine des causes

Pour planifier les actions permettant de réduire la perte en vitesse, il faut tout d'abord chercher les racines des causes trouvées, le tableau 7 regroupe les causes principales et leurs racines.

Tableau 7 : Origines des causes principales.

Causes principales	Racines des causes
Centrale thermique	<ul style="list-style-type: none">• Echange d'énergie électrique nul avec Maroc phosphore I et l'office national d'électricité (ONE)• Fuite sur les condenseurs• Problème au niveau des groupes turbo-alternateurs• Problème au niveau des lignes de concentration de l'acide phosphorique.• Problème au niveau de réseau vapeur (HP)
Engorgement de stockage de l'acide sulfurique	<ul style="list-style-type: none">• L'indisponibilité des lignes des réactions de l'acide phosphoriques• Faible soutirage de l'atelier phosphorique
Encrassement des filtres bougie	<ul style="list-style-type: none">• Entraînement de l'acide sulfurique dans TS (présence de sulfates)• Présence de poussières dans l'air
Augmentation de T° du palier avant soufflante	<ul style="list-style-type: none">• Frottement entre l'arbre de soufflante et les patins• Défaut d'alignement• Déplacement axial• Vieillessement de la turbo soufflante
Encrassement du filtre à gaz chaud	Présence des cendres dans le soufre liquide
Bouchage des brûleurs	Présence des cendres dans le soufre liquide



VI. Impact de la perte en vitesse en termes du tonnage produit

L'atelier de production de l'acide sulfurique joue un rôle important au niveau de la division MP II. Il assure en effet, l'alimentation de l'atelier phosphorique par l'acide sulfurique et la centrale thermoélectrique par la vapeur haute pression. Ainsi, la centrale thermoélectrique permet de transformer la vapeur en énergie électrique. La baisse de cadence des lignes de l'atelier sulfurique engendre une perte pour toute la division, ce qui se traduit par un manque à produire en acide sulfurique monohydrate (TMH), en P_2O_5 , en vapeur HP et en énergie électrique (équivalente en MWH). Le tableau 8 représente la perte pour chaque ligne durant une année d'étude, Les résultats trouvés sont calculés selon les relations suivantes :

- Le manque à produire en P_2O_5 = $\frac{\text{Le manque à produire en TMH}}{3.05}$
- Le manque à produire en vapeur HP = $1.165 \times \text{le manque à produire en TMH}$
- Le manque à produire en énergie (MWH) = $\frac{\text{Le manque à produire en vapeur}}{7.49}$

Tableau 8 : Impact de la perte en vitesse sur la production de H_2SO_4 , P_2O_5 , Vapeur et en énergie.

	Famille des causes	Manque à produire en H_2SO_4	Manque à produire en P_2O_5 (T)	Manque à produire en HP (T)	Manque en MWH
LIGNE A	Engorgement de stockage d'acide sulfurique	16 055	5 264	18 704	2 497
	Demande de la centrale	15 383	5 044	17 922	2 393
	Encrassement des filtres bougies	4 802	1 575	5 595	747
LIGNE B	Demande de la centrale	32 743	10 735	38 145	5 093
	Engorgement de stockage d'acide sulfurique	7 630	2 502	8 889	1 187
	Bouchage des brûleurs	3 238	1 061	3 772	504
LIGNE C	Demande de la centrale	9 380	3 075	10 928	1 459
	Engorgement de stockage acide	8 925	2 926	10 398	1 388



Augmentation de T° de palier avant soufflante	5 145	1 687	5 994	800
Bouchage des brûleurs	2 293	752	2 671	357
Encrassement du filtre à gaz chaud	2 153	706	2 508	335

TMH : tonne monohydrate
HP : vapeur haute pression

TA : tour de l'absorption
TS : tour de séchage

MWH : Mégawatt heure

Le tableau 8 montre bien que l'engorgement de stockage d'acide sulfurique et la demande de la centrale ont plus d'influence sur la production, telle que la perte en production de l'acide sulfurique monohydraté à cause de la demande de centrale est de 57 506 tonnes pendant l'année étudiée.

VII. Actions proposées

Pour pallier aux différents problèmes évoqués dans le tableau 7, nous avons essayé de proposer certaines actions résumées dans le tableau ci-après :

Tableau 9 : Actions proposées pour la diminution des pertes rencontrées.

Causes	Actions
Centrale thermique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Renouvellement des condenseurs auxiliaires de la vapeur excédentaire, 2. Etablissement d'un programme de bonne gestion des flux énergie/matière.
Engorgement de stockage acide sulfurique	<ol style="list-style-type: none"> 1. Bonne gestion des flux : <ul style="list-style-type: none"> ▪ Expéditions de l'acide sulfurique et l'échange avec les autres divisions, ▪ Expéditions de l'acide phosphorique 30% en P₂O₅, ▪ Alimentation de CAP par la vapeur provenant des autres divisions.
Bouchage des brûleurs	<ol style="list-style-type: none"> 1. Programmer le changement des brûleurs bouchés au cours d'un arrêt planifié, 2. Procéder au chauffage local de la zone bouchée. 3. Amélioration de la qualité de soufre liquide, 4. Amélioration de procédé de filtration de soufre liquide, 5. Contrôle systématique de l'état des purgeurs au niveau des conduites de transfert du soufre.
Augmentation de la température de palier avant la turbo soufflante	<ol style="list-style-type: none"> 1. Vérification de l'alignement, 2. Vérification de lubrification, 3. Changement systématique des coussinets et patins.
Encrassement du filtre à gaz chaud	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nettoyage du filtre à gaz chaud.



Encrassement des filtres bougies	1. Nettoyage des filtres bougies, 2. Changement des filtres bougies.
----------------------------------	---

VII.1 Criblage des actions proposées

Le principe consiste à choisir parmi la liste des solutions proposées celles les plus optimales et répondant au mieux à certains critères.

Parmi les critères d'évaluation visés, on trouve souvent l'efficacité, le coût, la rapidité, la facilité de mise en œuvre, etc. Dans notre cas, nous avons tenu compte de la rapidité et de la facilité de mise en œuvre. Le classement des critères varie suivant le type de solution à mettre en œuvre.

A. Priorité des solutions

Dans un premier temps, nous avons réalisé les diagrammes de priorité afin de répartir les solutions, la réalisation de chaque solution dépend du temps et de l'effort. Pour définir la priorité de ces solutions les unes par rapport aux autres, il suffit de les placer sur les axes des graphiques ci-après. La solution qui correspond au mieux au critère est celle qui présente le minimum du temps et le moins d'effort.

B. Diagrammes de priorités

B.1 Bouchage des brûleurs

Le diagramme ci-après représente la répartition des solutions proposées pour pallier problème de bouchage des brûleurs.

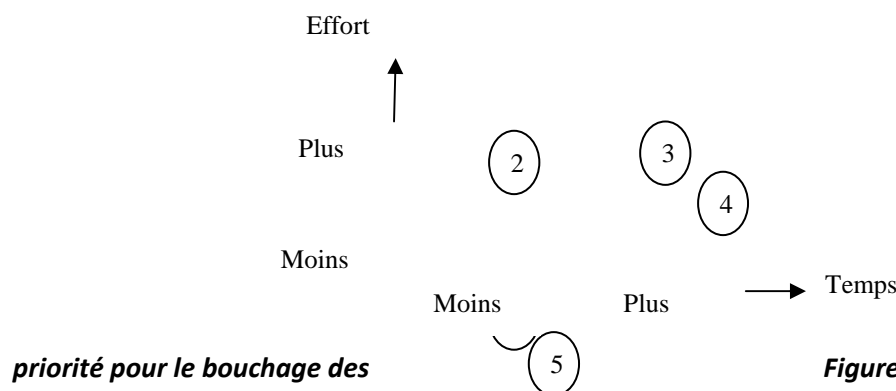


Figure 19 : Diagramme de brûleurs.

Interprétation :

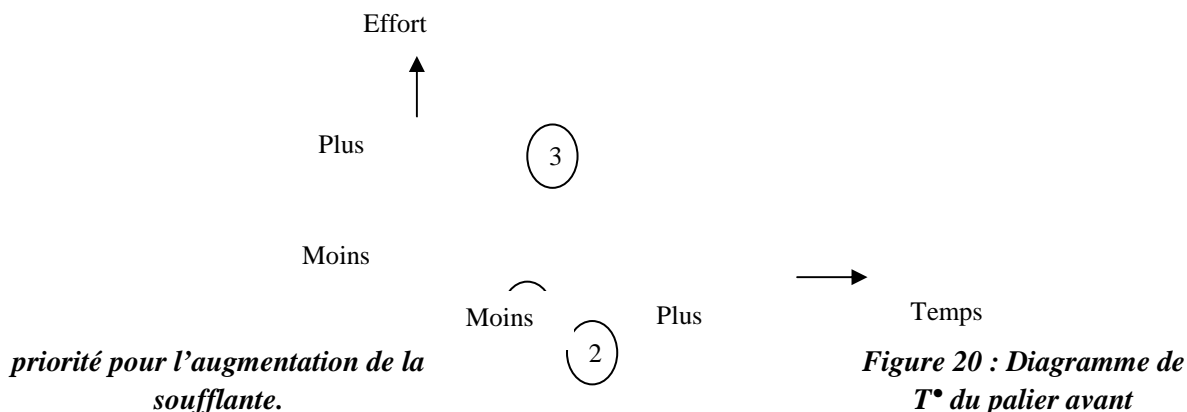


- Les solutions optimales nécessitant moins d'effort, un court délai, et qu'on peut exécuter dans l'immédiat sont :
 - Contrôle systématique de l'état des purgeurs au niveau des conduites de transfert du soufre,
 - Changement des brûleurs bouchés au cours d'un arrêt planifié ;

- La solution nécessitant moins de temps et plus d'effort sera le chauffage local de la zone bouchée.

- Les solutions 3 et 4 proposées dans le tableau 9 sont importantes, mais on les a reportées du fait de leurs critères, car elles exigent plus de temps et plus d'effort.

B.2 . Augmentation de la température du palier avant soufflante



Interprétation :

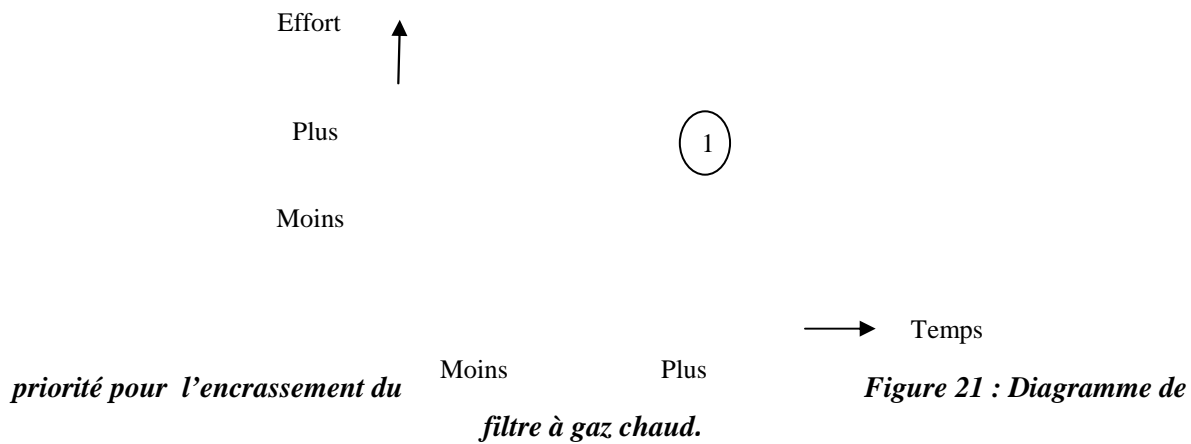
Le diagramme montre clairement que les deux actions sur lesquels on doit travailler en priorité sont :

- La vérification de l'alignement,
- Et la vérification de lubrification.

La troisième action qui est le changement systématique des coussinets et patins vient après puis qu'elle nécessite plus d'effort.



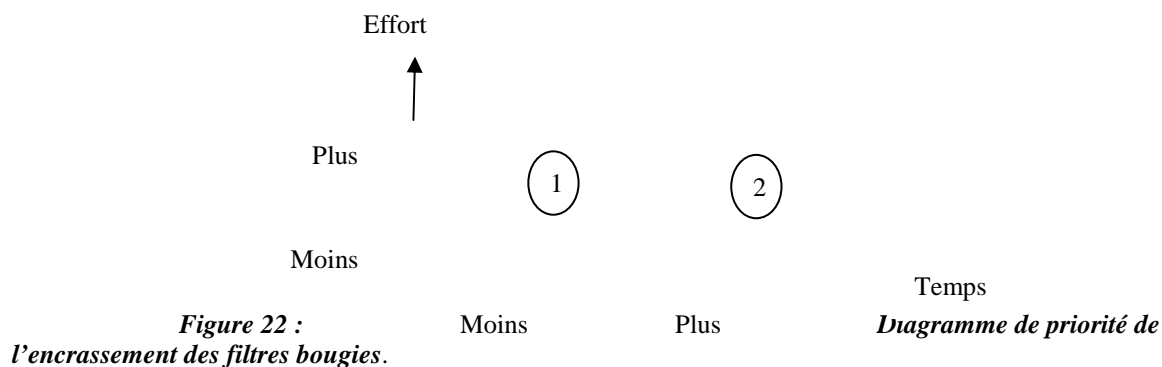
B.3 Encrassement du filtre à gaz chaud



Interprétation :

La seule solution qu'on peut appliquer pour résoudre le problème de l'encrassement du filtre à gaz chaud est le nettoyage du filtre, cette action nécessite plus de temps et plus d'effort.

B.4 Encrassement des filtres bougies



Interprétation :



Suite à l'analyse du diagramme (figure 20), la solution pertinente à appliquer en premier lieu est le nettoyage des filtres bougies, cette solution nécessite plus d'effort avec un délai court. L'autre solution c'est-à-dire le changement des filtres est appliqué dans le cas où le nettoyage des filtres ne donne pas le résultat souhaité.

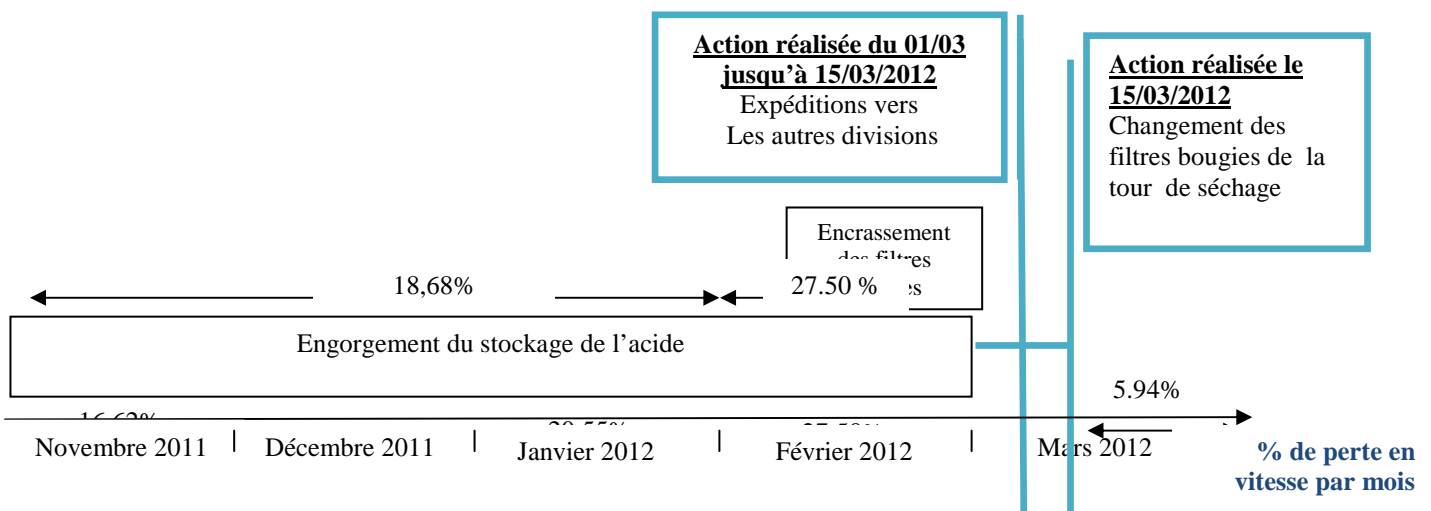
VII.2 Réalisation des actions définies

Après priorisation des actions proposées, nous passons à l'acte et réalisons concrètement quelques actions.

Dans les schémas suivants, nous avons présenté pour les lignes A et C la durée de perte en vitesse correspondante à chaque cause principale, la date de réalisation des actions proposées, ainsi que le pourcentage de perte en vitesse avant et après l'exécution des solutions.

1) Ligne A :

Le diagramme ci après représente l'évolution de perte en vitesse engendrée par les causes principales.



Il ressort de ce diagramme les résultats suivants :

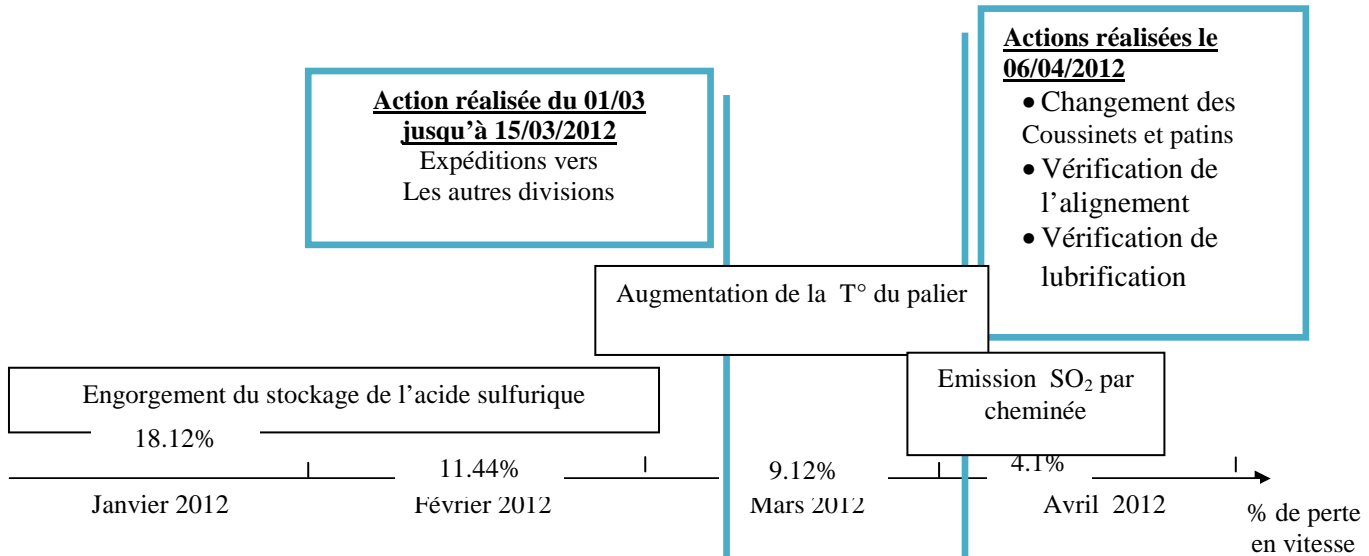
- 18,68% de perte en vitesse de la période allant de novembre 2011 jusqu'à la fin de janvier 2012 est due au problème de l'engorgement du stockage d'acide. Au début du mois février, le pourcentage de la perte accroît jusqu'à atteindre 27,5% ; cette augmentation est causée par l'encrassement des filtres bougies de la tour de séchage.



- Le soulagement des bacs du stockage de l'acide par expédition envers d'autres divisions (réalisé au début du mois de mars) et le changement des filtres bougies de la tour de séchage permet de réduire la perte en vitesse de **27,5 à 5,94%**.

2) Ligne C :

Le schéma ci-dessous représente la situation avant et après la réalisation des solutions.



Le diagramme ci-dessus présente l'évolution de perte en vitesse durant la période de janvier jusqu'au mois d'avril 2012. Au cours de cette période, deux causes principales ont été détectées; le problème de l'engorgement du stockage de l'acide sulfurique qui influence sur la production par 18.12% de perte en vitesse pendant le mois du janvier et 11.44% dans le mois de février. Au début du mois de mars et après soulagement du stockage de l'acide sulfurique, le pourcentage de la perte a diminué jusqu'au 9.12%. Ainsi l'action réalisée pour résoudre ce problème nous a permis de réduire 5.66 % de perte totale. Le 9.12% de perte qui en reste est du à l'apparition d'un autre problème reliable à l'augmentation de la température du palier avant de la soufflante. L'application de l'action proposée pour ce dernier ne s'effectue qu'au début du mois d'avril. La moyenne hebdomadaire de perte en vitesse après le changement des coussinets et patins plus la vérification de l'alignement et de lubrification, se réduit jusqu'au 4.12%. Donc cette action permet de réduire 5.02% de perte totale en vitesse. Le 4,12% de perte mentionnée au cours du mois d'avril est due à l'émission des gaz SO₂ par la cheminée.



Conclusion :

Les solutions appliquées pour les lignes A et C ont donné des résultats satisfaisants, les deux solutions réalisées au niveau de la ligne A permettent de réduire de 21,56% en perte totale. Pour la ligne C, le soulagement du stockage réduit la perte de 2.32% ; et le changement des coussinets et patins et la vérification de l'alignement réduit de 5.02 % en perte totale.

Le problème de la centrale thermique est un problème externe nécessite des actions correctives à long terme et au niveau de la gestion interne de toute la division. Pour les problèmes liés aux équipements nous recommandons d'élaborer un plan d'entretien préventif et rigoureux.

B. Etude du bilan matière

Introduction



Le bilan matière consiste à évaluer la composition et les débits des flux entrant et sortant d'un système et à contrôler la performance des équipements.

I. Bilan matière de la ligne sulfurique

I.1 Présentation des données

- Production journalière est égale à 1750 tonnes d'acide sulfurique monohydrate.
- Taux de conversion est de : 98%
- Concentration de l'anhydride sulfureux (SO₂) à la sortie du four est : 10 % en volume dans les gaz de combustion.
- M (O) = 16 g /mole, M (S) =32 g /mole, M (H) =1 g /mole
- Masse volumique du soufre : $\rho(s) = 2060 \text{ kg/m}^3$
- Volume molaire : $V_m = 22.4 \text{ l/mole}$.
- Masse volumique d'acide sulfurique : $\rho (\text{H}_2\text{SO}_4) = 1,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$
- Masse volumique d'air sec : $1,1 \text{ kg/m}^3$
- Masse molaire de l'air est de 29 g/mol.

I.2 Production horaire d'acide sulfurique H₂SO₄ (98,5 et 100%)

- ✓ Production d'acide sulfurique à 98.5%

La production journalière d'acide sulfurique est 1750 t pour chaque ligne titrant de 98,5 %.

Ainsi, la production horaire est calculée selon l'équation suivante :

→	1750 t	24 heures
→	P(H ₂ SO ₄)	1 heure

$$P (\text{H}_2\text{SO}_4)_{98.5\%} = \frac{1750 \times 1}{24} = 72.92 \text{ t/h}$$

- ✓ Production d'acide sulfurique à 100 % :

Le titre d'acide sulfurique produit est de 98.5%, donc la production H₂SO₄ à 100% est égale

à :

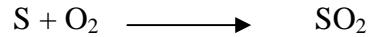
$$P_{100\%} = \frac{P_{98.5\%} \times 98,5}{100} = 1724 \text{ t/j}$$



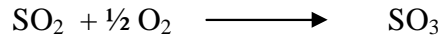
$$P(\text{H}_2\text{SO}_4)_{100\%} = 71.83 \text{ t/h}$$

Le procédé de production de l'acide sulfurique se réalise en 3 étapes principales :

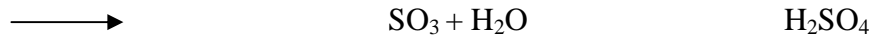
- **Combustion du soufre liquide :**



- **Conversion de l'anhydride sulfureux en anhydride sulfurique :**



- **Absorption de l'anhydride sulfurique:**



Donc le bilan de l'équation est:



I.3 Etape de combustion :

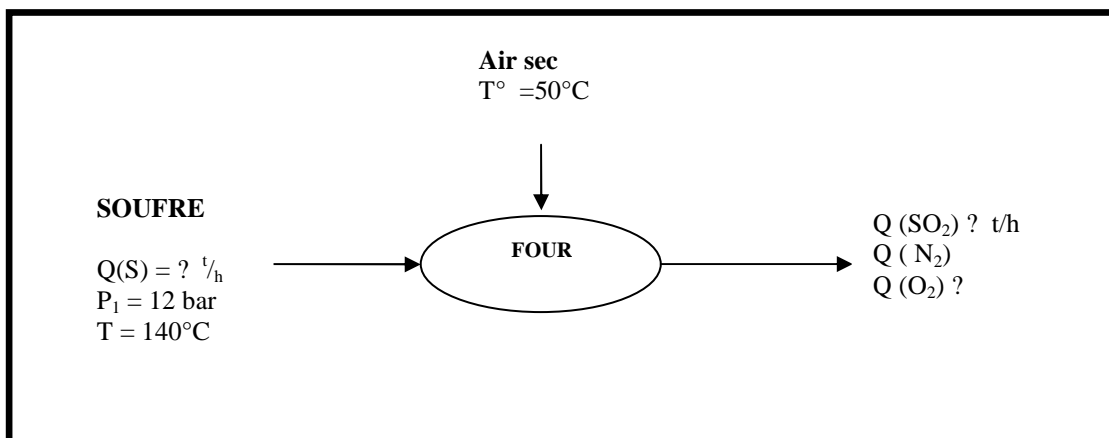


Figure 23 : Schéma des entrées-sorties du four

a) C

alcul des débits du soufre liquide:

- **Débit massique**

D'après l'équation bilan, on a une mole de soufre qui réagit pour donner une mole d'acide sulfurique monohydraté. Donc, le débit massique de consommation du soufre $Q_m(\text{S})$ est :

$$Q_M(\text{H}_2\text{SO}_4) = Q_M(\text{S})$$

$$\text{Avec: } Q_M(\text{S}) = \frac{Q_m(\text{S})}{M(\text{S})} \quad \text{et} \quad Q_M(\text{H}_2\text{SO}_4) = \frac{Q_m(\text{H}_2\text{SO}_4)}{M(\text{H}_2\text{SO}_4)}$$



Donc: $Q_m(S) = \frac{Q_m(H_2SO_4)}{M(H_2SO_4)} * M(S)$

$$Q_m(S) = 23.80 \text{ t/h}$$

• **Débit volumique**

Le débit volumique est le rapport entre le débit massique et la masse volumique.

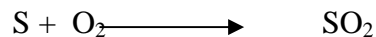
$$Q_v(S) = Q_m(S) / \rho(s) = 23.80 * 10^3 / 2060$$

$$Q_v(S) = 11.50 \text{ m}^3/\text{h}$$

b) Calcul des débits des gaz sortant du four

✓ **Débit d'anhydride sulfureux formé $Q(SO_2)$**

La réaction de combustion est :



Le rendement de cette combustion est supposé 100 %.

D'après cette réaction, une mole du soufre donne une mole d'anhydride sulfureux SO_2 ; d'où le débit massique de SO_2 est :

$$Q_m(SO_2) = \frac{Q_m(S) \times M(SO_2)}{M(S)}$$

$$Q_m(SO_2) = 47.6 \text{ t/h}$$

Si on assimile SO_2 à un gaz parfait aux conditions normales de pression et de température et à un volume molaire de 22.41 l/mole on aura :

$$Q_v(SO_2) = \frac{Q_m(SO_2) \times V_m}{M(SO_2)}$$

$$Q_v(SO_2) = 17\,010 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

✓ **Débit volumique des gaz à la sortie du four**

Le pourcentage de SO_2 à la sortie du four est de 10 % en volume des gaz de sortie du four, donc le débit volumique total de ce dernier est :

$$Q_v(\text{gaz}) = \frac{100 \times Q_v(SO_2)}{10}$$



$$Q_v(\text{gaz}) = 170\,100 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

c) Calcul du débit d'air à l'entrée du four

Le débit de gaz sortie du four est égal approximativement au débit d'air $Q(\text{air})$ à mettre en œuvre à l'entrée du four :

$$Q_v(\text{air})_{\text{ef}} = Q_v(\text{gaz})_{\text{sf}}$$

$$Q_v(\text{air})_{\text{ef}} = 170\,100 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

✓ Débit d' O_2 et de N_2 à l'entrée du four

L'air est composé de :

- 20.95 % en volume d' O_2
- 78.08 % en volume d' N_2
- moins de 1 % d'autres gaz.

Donc :

$$\frac{21 \times Q_v(\text{air})_{\text{ef}}}{100} = 35\,721 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\frac{78.08 \times Q_v(\text{air})_{\text{ef}}}{100} = 132\,814 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

d) Calcul du débit d' O_2 à la sortie du four

Le débit volumique de l'oxygène à la sortie du four est la différence des débits volumique d'oxygène à l'entrée du four et consommé dans la combustion :

$$Q_v(\text{O}_2)_{\text{sf}} = Q_v(\text{O}_2)_{\text{ef}} - Q_v(\text{O}_2)_{\text{con}}$$

$$Q_v(\text{O}_2)_{\text{sf}} = 18\,711 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

I.4 Etape de la conversion.

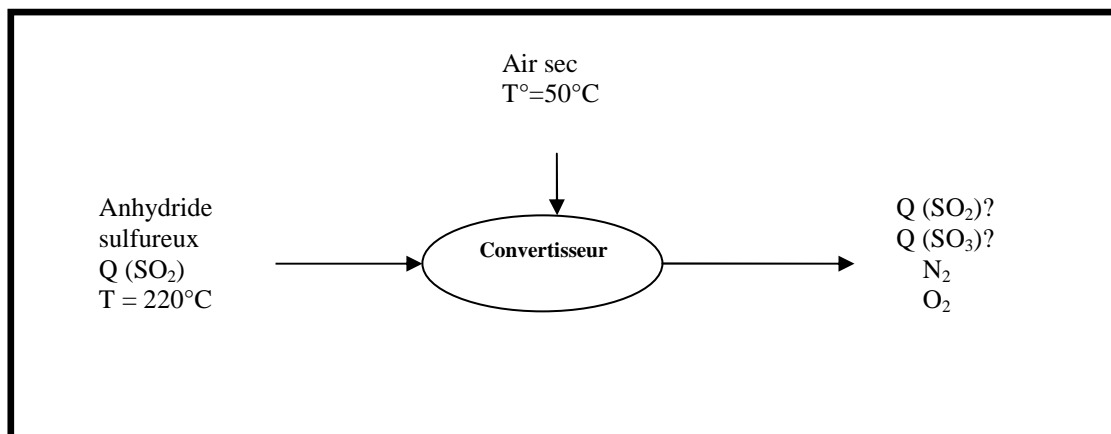


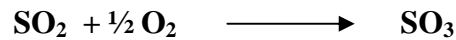
Figure 24 : Schéma des entrées



-sorties du convertisseur

1) Débit d'oxygène consommé dans l'étape de la conversion ($Q_V(O_2)_{c.v}$)

D'après la réaction suivante :



Le débit volumique d' O_2 ($Q_V(O_2)_{c.v}$) consommé lors de la conversion de SO_2 est égal à la moitié du débit volumique de SO_2 transformé en SO_3 en tenant compte du rendement de la conversion qui est de 98% :

$$Q_V(O_2)_{c.v} = \frac{Q_V(SO_2) \times 98}{2 \times 100} = 8\,334,9 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

2) Débit de SO_3 formé:

$$Q_V(SO_3) = \frac{Q_V(SO_2) \times 98}{100}$$

$$Q_V(SO_3) = 16\,669,8 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

3) Débit d' O_2 à la sortie de la cheminée ($Q_V(O_2)_{s.ch}$)

Le débit d' O_2 à la sortie de la cheminée est égal à la différence entre le débit d' O_2 à la sortie du four ($Q_V(O_2)_{s.f}$) et le débit d' O_2 consommé lors de la conversion :

$$\begin{aligned} Q_V(O_2)_{s.ch} &= Q_V(O_2)_{s.f} - Q_V(O_2)_{c.v} \\ Q_V(O_2)_{s.ch} &= 18\,711 - 8\,334,9 \end{aligned}$$

$$Q_V(O_2)_{s.ch} = 10\,376,1 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

4) Débit de N_2 à la sortie de la cheminée

L'azote N_2 constitue 78.08 % en volume de l'air à l'entrée du four, et puisqu'il ne subit aucune transformation (gaz inerte) donc son débit volumique à l'entrée du four est le même que celui à la sortie de la cheminée.

5) Débit du SO_2 à la sortie de la cheminée ($Q_V(SO_2)_{ch}$)

Le débit du SO_2 à la sortie de la cheminée est :

$$Q_V(SO_2)_{cc} \times 2$$



$$Q_V(\text{SO}_2)_{\text{ch}} = \frac{\quad}{100}$$

$$Q_V(\text{SO}_2)_{\text{ch}} = 340,2 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

I.5 Etape de l'absorption

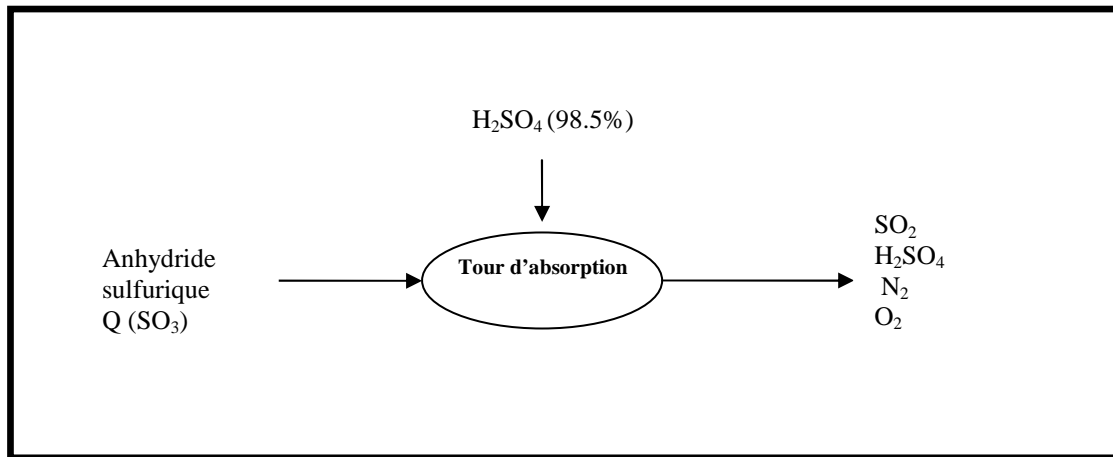
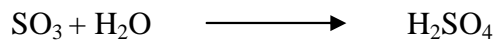


Figure 25 : Schéma des entrées-sorties de la tour d'absorption

1)

calcul du débit massique de l'eau dans la tour d'absorption

D'après la réaction d'absorption suivante :



On remarque que le débit molaire de l'acide sulfurique est égal à celui de l'eau de dilution :

$$Q_M(\text{H}_2\text{O}) = Q_M(\text{H}_2\text{SO}_4)$$

$$\text{D'où } Q_m(\text{H}_2\text{O}) = \frac{Q_m(\text{H}_2\text{SO}_4) \times M(\text{H}_2\text{O})}{M(\text{H}_2\text{SO}_4)}$$

$$Q_m(\text{H}_2\text{O}) = 13.4 \text{ t/h}$$

Le résumé des résultats trouvés sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau 8 : Résumé du bilan matière

Etapes	Eléments	Débit volumique d'entrée (m ³ /h)	Débit volumique de sortie (m ³ /h)
Combustion	S	11.5	----
	O ₂	35 721	18 711.0



	N_2	132 814	132 814.0
	SO_2	----	17 010.0
Conversion	SO_2	17 010	340.2
	SO_3	-----	16 669.8
	O_2	18 711	10 378.1
	N_2	132 814	132 814.0
Absorption	SO_3	16 669.8	-----
	SO_2	340.2	340.2
	N_2	134 379	134 379.0
	O_2	10 378.1	10 378.1
	H_2SO_4 (98.5%)	----	40.5

Conclusion

Cette étude nous a permis de déterminer les débits de différentes matières mises en jeu dans le procédé de fabrication de l'acide sulfurique, les débits des matières produites ainsi que les débits des rejets.

Conclusion générale et perspectives

La période du stage passé au sein du Maroc phosphore II à l'atelier sulfurique de Safi était une occasion pour moi de traiter et de contribuer à la résolution d'un problème majeur et gênant qui est la perte en vitesse au niveau de l'atelier par application d'une démarche structurée qu'est la méthode de résolution des problèmes. Cette étude nous a permis d'identifier, d'analyser les causes, de proposer des solutions et enfin de suivre l'efficacité des solutions réalisées.



Les solutions que nous avons proposées et appliquées durant la période de mon stage étaient fiables. Il est aussi fortement recommandé d'appliquer d'autres solutions proposées et qui ne sont pas encore mis en route et en particulier le respect des délais de maintenance afin d'éviter d'autres problèmes liés à l'origine des équipements.

Et enfin, un bilan matière de la ligne sulfurique a été élaboré en calculant les débits des produits consommés, fabriqués et rejetés lors des étapes de production de l'acide sulfurique.

En perspective à ce travail, il est utile de souligner la complexité du problème étudié puisqu'il est lié à d'autres ateliers (atelier de production de l'acide phosphorique et centrale thermoélectrique). De ce fait, nous recommandons à ce que ce sujet soit repris (vu son intérêt économique) et ce dans le cadre d'un grand projet d'évaluation des pertes en collaboration avec les ateliers phosphorique et la centrale thermique.

Bibliographie

- BENAZOUZ & ZANOUN, Transfert d'expertise (PCS/PM/PS) « CANEVAS », document interne, Maroc phosphore II, OCP Safi.
- Manuel opératoire tome I, document interne, Maroc phosphore II, OCP Safi.
- Manuel opératoire tome II, document interne, Maroc phosphore II, OCP Safi.

Webographie



-
- <http://dc338.4shared.com/doc/PYYTHs2M/preview.html>
 - <http://dc147.4shared.com/doc/8HeAIbhr/preview.html>
 - WWW.WIKIPEDIA.COM
 - www.ocpgroupe.ma
 - http://www.scenaris.com/pdf/resolution_de_problemes.pdf



ANNEXES

- Annexe I : Schéma général du procédé de fabrication de l'acide sulfurique.
Annexe II : Tableau de recensement des causes pour la ligne de production A.