



### Table des matières

<b>I. Introduction</b> .....	1
<b>II. Présentation de l'entreprise</b> .....	2
<b>III. Les unités de production</b> .....	3
1. Production d'acide sulfurique : .....	3
2. Production d'acide phosphorique :.....	3
3. Centrale électrique : .....	4
<b>IV. Lignes de production des engrais</b> .....	4
1. Généralités sur les engrais : .....	4
1.1. Historique :.....	4
1.2. Description des engrais : .....	4
1.3. Rôle des principaux éléments constituants les engrais :.....	5
1.4. Terminologie des engrais :.....	5
2. Description des lignes de production des engrais :.....	6
2.1. Les unités des engrais : .....	6
2.2. Matières premières et stockage :.....	6
<b>V. Procédé de fabrication des engrais</b> .....	7
1. Principe de fabrication : .....	7
2. Pré-neutraliseur (PN) :.....	8
3. Granulation : .....	9
3.1. Principales composantes .....	10
3.2. Principe de granulation .....	10
4. Séchage : .....	12
4.1. Les principaux composants : .....	12
4.2. Principe de procédé : .....	14
5. Classification et broyage : .....	15
5.1. Classification granulométrique : .....	15
5.2. Les broyeurs : .....	16
6. Le conditionnement du produit : .....	17
6.1. Le refroidissement : .....	17
6.2. L'enrobage : .....	17



## Rapport de stage



7. Système de lavage :	17
8. La vaporisation de l'ammoniac :	18
VI. Dimensionnement d'un réchauffeur de fuel lourd.....	18
1. Les caractéristiques du fuel lourd :	18
2. Le brûleur :	20
3. Les échangeurs thermiques :	21
3.1. Description :	21
3.2. Théorie des échangeurs :	21
3.3. Types d'échangeurs thermiques :	24
4. Description du problème :	26
5. Dimensionnement du réchauffeur de fuel :	27
6. Sécurité du réchauffeur du fuel :	33
VII. Conclusion .....	34
VIII. Références bibliographiques :	35



### I. Introduction

De tout temps, la culture fait appel aux engrais comme source d'éléments nutritifs du sol pour améliorer la production aussi bien quantitativement que qualitativement. L'OCP étant le premier exportateur mondiale de l'acide phosphorique a toujours une vision de satisfaire ses clients en matière de l'acide phosphorique et en engrais. Environ la moitié de la production du complexe Maroc Phosphore III & IV est concentré puis exportée comme produit semi-fini (acide phosphorique marchand), tandis que l'autre moitié est transformée localement en engrais solide. La majeur partie de ces engrais, ou le DAP et MAP sont largement prédominant, sont expédiées hors du Maroc.

La demande des clients est plus en plus exigeante en matière de la qualité des engrais et surtout les titres et la teneur en eau des produits fini. En effet, la qualité des titres constitue l'une des principales préoccupations de l'unité de production des engrais. Cette qualité demandée dépend des exigences des clients et une simple perturbation de la marche de production influe sur la qualité du produit fini. Il est donc primordial non seulement de maîtriser le procédé de fabrication pour satisfaire ces exigences, mais aussi il est essentiel que les lignes de production travaillent dans des conditions optimales pour une meilleure productivité et rentabilité.

C'est donc dans ce contexte que s'inscrit ce travail de fin d'études et dont l'objectif est l'optimisation des opérations de séchage et de combustion au niveau du sécheur. Ainsi que le conditionnement convenable pour utiliser fuel lourd n°2.



## II. Présentation de l'entreprise

L'Office chérifien des Phosphates fut créé le 7 août 1920 par décret, il réservera à l'Etat 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 d'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'appréciation des pays demandeurs.

Malheureusement, cette expansion fut interrompue brusquement à cause de la chute des prix sur le marché mondial, ce qui a poussé l'Etat ainsi que l'OCP à trouver les moyens appropriés pour échapper à cette crise, notamment en valorisant ce produit à travers son industrialisation en produisant des dérivés se singularisant d'une part, par une qualité compétitive et qui sont très sollicitées par le marché mondial, d'autre part.

Pour cela, l'OCP a commencé une très large industrialisation en édifiant des usines pour la production des dérivées des phosphates (acide phosphorique, fertilisants, etc...), ce qui constituera le noyau du groupe OCP.

Le groupe OCP livre aux cinq continents de la planète, ses exportations représentent 25 à 30% du commerce international du phosphate.

Les activités liées aux phosphates concernent cinq zones géographiques du pays (3 sites d'exportations minières : Khouribga-Youssoufia, Boucraa-Laayoun et deux sites de transformation chimique : JorfLasfar et Safi) qui constituent un vecteur de développement régional et national important.

- 1920 : Début de l'extraction du phosphate à Boujniba (Khouribga).
- 1930 : Ouverture d'un nouveau centre de production de phosphate (Youssoufia).
- 1950 : Mise en œuvre de la méthode d'extraction en découverte à Khouribga.
- 1960 : Développement de la mécanisation du souterrain à Youssoufia.
- 1965 : Démarrage de Maroc phosphore I-II à Safi.
- 1970 : Création de la structure organisationnelle intégrant l'OCP et ces entreprises filiales.
- 1980 : Partenariat industriel en Belgique : démarrage du site de JorfLasfar avec Maroc phosphore III-IV.
- 1990 : Exportation des nouveaux projets de partenariat industriels de renforcements des capacités.
- 2000 : Démarrage d'une unité de flottation de phosphate à Khouribga.
- 2004 : Création de la Société « Pakistan Maroc Phosphore » S.A en Joint-venture entre l'OCP et FaujiFertilizer Bin Qasim Limited(Pakistan).
- 2006 : Projet nouvelle ligne DAP 850 000 t/an à JORF LASFAR.
- 2009 : Démarrage de Bunge Maroc Phosphore.
- 2010 : Partenariat avec Jacobs Engineering Inc. Lancement de 4 unités de production d'engrais à JorfLasfar.
- 2011 : Lancement d'une unité de dessalement d'eau de mer à JorfLasfar.
- 2013 : Démarrage du pipeline reliant Khouribga à JorfLasfar.

### III. Les unités de production

#### 1. Production d'acide sulfurique :

L'atelier sulfurique du Maroc phosphore III-IV est composé de 6 unités de production d'acide sulfurique « REVANPING » en 1998 (capacité unitaire quotidienne est passée de 2300TMH/J à 2650TMH/J d'acide produit à la concentration de 98,5%), a démarré en 1986. Les unités sont à double absorption. Le taux de SO<sub>2</sub> vers le convertisseur est de 12%. Le taux de conversion est de 99,5%. Ce qui correspond à 750 ppm de SO<sub>2</sub> à la sortie de la cheminée.

L'atelier sulfurique a pour rôles essentiels :

- La production de l'énergie ; sous forme de vapeur.
- La fabrication d'acide sulfurique par le procédé à double absorption.

L'unité sulfurique est conçue pour produire l'acide sulfurique, qui entre dans la fabrication de l'acide phosphorique. Les étapes d'oxydation et d'absorption dans la fabrication de l'acide sulfurique à partir du soufre comme matière première sont hautement exothermiques.

Les principales étapes du procédé consistent à brûler du soufre (S) avec de l'air afin de former du dioxyde de soufre SO<sub>2</sub>, à combiner le dioxyde de soufre avec de l'oxygène O<sub>2</sub> pour former du trioxyde de soufre SO<sub>3</sub>, et à combiner ce trioxyde de soufre avec de l'eau H<sub>2</sub>O pour obtenir une solution d'acide sulfurique H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

#### 2. Production d'acide phosphorique :

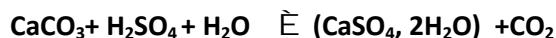
L'atelier phosphorique est composé de 8 lignes de production d'acide phosphorique ayant une capacité unitaire journalière de 500 tonnes et de 16 unités de concentration d'une capacité de 30 tonnes par jour chacune. La fabrication de l'acide phosphorique par voie humide résulte de la réaction chimique suivante :



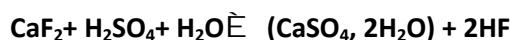
Cette réaction est un simple déplacement d'un sel d'acide faible Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> par un acide fort H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, le gypse produit peut être éliminé par une simple filtration.

En fait, la réaction est beaucoup plus complexe, car le phosphate contient un grand nombre d'impuretés qui peuvent avoir un impact néfaste. Parmi ces impuretés, on peut citer :

- Le carbonate de calcium qui réagit avec l'acide sulfurique, suivant la réaction :



- Le dégagement de CO<sub>2</sub> favorise la formation des mousses en présence de matières organiques.
- Le fluorure de calcium réagit avec l'acide sulfurique suivant la réaction :

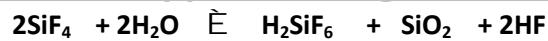


- La silice en présence d'acide fluorhydrique génère de l'acide fluosilicique (H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub>) ces deux acides sont très corrosifs :





## Rapport de stage



### 3. Centrale électrique :

La centrale électrique a comme rôle la production, la distribution de l'énergie électrique et la gestion de la vapeur HP/MP/BP.

Elle se compose de :

- Deux chaudières auxiliaires de capacité de 25 T/h chacune.
- Trois groupes turboalternateur.
- Un groupe électrogène.
- Un réseau de vapeur HP/MP/BP appelé barillets.
- Une salle des pompes et bâches alimentaires et condensats.

## IV. Lignes de production des engrais

### 1. Généralités sur les engrais :

#### 1.1. Historique :

On a reconnu l'utilité des engrais dès la plus haute antiquité. Ce furent, toutefois, les romains qui employèrent les premiers fumiers de façon systématique, pour enrichir les sols qu'ils cultivaient. Ce procédé est encore utilisé de nos jours, il donne d'excellents résultats. Une telle pratique ne reposait au départ sur aucune base scientifique confirmée, puisque les anciens pensaient que les plantes se nourrissaient de composés organiques présents dans le sol.

Cette hypothèse ne fut contestée qu'au XVI siècle, lorsque Bernard Palinez (1510-1589) affirma que les végétaux ne peuvent assimiler que des produits minéraux existant dans l'eau. Lavoisier découvrit en 1792, et formula le premier, les relations qui amènent le monde végétal au monde minéral, au siècle suivant, les français Payen, Boussingault et l'Allemand Liebig établissent le rôle fertilisant de certaines matières minérales, et permettent à l'industrie des engrais chimiques de se développer à partir de 1860.

Parmi les matières minérales, celles contenant le phosphate s'avèrent toujours irremplaçables en agriculture vu le rôle que joue cet élément dans le développement des plantes, leurs croissance, la rigidité de leurs tissus et même dans la résistance qu'elles opposent aux maladies.

Le phosphore n'a, à ces égards, aucun substitut et ce fait, explique toute l'importance de l'industrie des engrais phosphatés et la diversité des engrais qu'elle produit.

#### 1.2. Description des engrais :

Les engrais sont des composés chimiques qui donnent au sol les éléments fertilisants dont il a besoin. Ces éléments peuvent exister naturellement dans le sol ou y sont apportés artificiellement sous différentes formes :

- Sous forme stable dans la solution sol, ces engrains sont presque immédiatement utilisés par la plante.
- Sous forme de cations ou d'anions échangeables, fixés par le complexe adsorbant du sol, ces ions sont progressivement mis à la disposition de la plante.

### 1.3. Rôle des principaux éléments constituants les engrais :

Les différentes classes des éléments nécessaires à la croissance des végétaux sont :

-Les éléments fertilisants majeurs : L'azote, le phosphore et le potassium.

- L'azote : il contribue au développement végétatif de toutes les parties aériennes de la plante. Il permet à la plante de fabriquer, en quantité et en vitesse accrue, les acides nucléiques, aminés ainsi que la synthèse des protéines et de la chlorophylle pour permettre à la plante une croissance plus rapide.
- Le phosphore : il favorise la croissance et le développement de la plante, ainsi que la rigidité des tissus et sa résistance aux maladies.
- Le potassium : qui contribue à favoriser la floraison et le développement des fruits. On parle des engrais ternaires de type NPK si les trois sont associés. Sinon, on parle également des engrais binaires NP, NK, PK ou d'engrais simples s'ils sont constitués d'un seul de ces éléments N ou P ou K.

-Les éléments fertilisants secondaires : Le calcium, le magnésium, le soufre et le sodium.

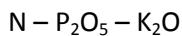
-Les oligo-éléments : Bore, chlore, cuivre, magnésium, molybdène, le zinc... participent à faible dose à la nutrition des végétaux (quelques centaines de grammes à quelques kilogrammes par hectare). Au-delà d'une certaine concentration, ils deviennent toxiques pour les plantes.

### 1.4. Terminologie des engrais :

- Engrais simples : Ce sont des engrais ayant une teneur déclarée en un seul élément fertilisant majeur N, P ou K
- Engrais composés : Ce sont des engrais ayant des teneurs déclarées en au moins deux éléments fertilisants majeurs. Il s'agit des engrais binaires (NP, PK, NK) ou des engrais ternaires (NPK).

Les teneurs des éléments fertilisants des engrais sont exprimées en Azote (N), en Anhydride phosphorique ( $P_2O_5$ ) et en oxyde de potassium ( $K_2O$ ).

Dans le cas des engrais composés, les teneurs sont exprimées en pourcentage massique selon l'ordre suivant :



Parmi les formules d'engrais fabriquées à partir du phosphate naturel on peut citer :

- Engrais simples :
  - Le simple superphosphate SSP : 18% en  $P_2O_5$ .
  - Le triple superphosphate TSP : 45% en  $P_2O_5$ .
- Engrais composés (binaires) :
  - Le phosphate mono-ammoniaque : MAP (11-55-0)
  - Le phosphate di-ammoniaque : DAP (18-46-0)
  - Le sulfo-phosphate d'ammonium : ASP (19-38-0)



## Rapport de stage



- Engrais composés (ternaire) :

À partir des engrais composés binaires cités ci-dessous on peut fabriquer des engrais ternaires, par l'addition physique de composés tels que, le chlorure de potassium KCl ou le sulfate de potassium  $K_2SO_4$ .

### 2. Description des lignes de production des engrais :

#### 2.1. Les unités des engrais :

L'atelier des fertilisants de Maroc Phosphore III et IV est constitué de sept lignes de production : quatre anciennes lignes et trois nouvelles lignes plus des unités annexes.

- **Anciennes lignes :**

- Date de démarrage: 1986
- Capacité initiale : 1.625.000 T équivalent DAP/an (procédé AZF)
- Capacité actuelle : 2.100.000 T équivalent DAP/an (procédé JACOBS)
- Qualités produites :
  - Initiales: DAP et TSP;
  - Actuelles : DAP, TSP, MAP, NPK, ASP

- **Nouvelles lignes:**

- Démarrage :
  - 107A :2007
  - 107B/C : 2013
- Procédé : JACOBS ENGINEERING
- Mode de réalisation : EPCM (Engineering Procurement Construction Management) par JESA.
- Capacité : 850 000 T équivalent DAP/an (procédé JACOBS).

#### 2.2. Matières premières et stockage :

Les matières premières utilisées pour la fabrication des engrais sont :

- Acide phosphorique 54% en  $P_2O_5$ .
- Acide phosphorique 29% en  $P_2O_5$ .
- Ammoniac gaz ( $NH_3$ ).
- Acide sulfurique 98,5% ( $H_2SO_4$ ).
- Liquide de lavage.
- Huile aminée d'enrobage.
- Fuel lourd N°2.
- Vapeur basse et moyenne pression (BP et MP).
- Air d'instrumentation.
- Eau.

Les conditions de stockage des matières premières seront présentées sur le tableau suivant :

Matières premières	Conditions de stockage
Acide phosphorique 54% en P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 54% est reçu de l'unité d'acide phosphorique et stocké dans un bac de briques anticorrosif d'une capacité de 1500 m <sup>3</sup> à une température de 28 à 30°C et une pression de 1 atm.
Acide phosphorique 29% en P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Les conditions de stockage de H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 29% et H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 54% sont pareils.
Ammoniac (NH <sub>3</sub> )	L'ammoniac est importé par navires et dépoté en phase liquide dans des réservoirs (2500 tonnes chacun) où il est stocké à la température de -33°C, correspondant à une pression de 1013 mbar.
Acide sulfurique 98,5% (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	L'acide sulfurique est fourni par le complexe existant. Il est stocké dans le réservoir d'acier du carbone avec un dessiccateur de passage. Le dessiccateur empêche l'entrée de l'humidité de l'atmosphère pour éviter la corrosion du réservoir.
Eau	L'eau est stockée dans un bac d'une capacité de 3015 m <sup>3</sup> .
Fuel N°2	Le fuel est stocké dans un réservoir vertical avec un toit conique. Ce réservoir a une capacité de stockage de 15 jours. La température du fuel est maintenue à 80°C à l'aide de la vapeur.
Huile d'enrobage	Le réservoir d'huile est un réservoir d'acier du carbone avec le fond plat et un toit conique. Il a des réchauffeurs au fond du réservoir pour maintenir la température d'huile dans le réservoir et un réchauffeur d'aspiration pour la température de maintien dans les lignes de transfert.

Tableau 1 : Condition de stockage des matières premières

## V. Procédé de fabrication des engrains

### 1. Principe de fabrication :

La description suivante est applicable à l'ensemble de granulation pour la production de di-ammonium phosphate (DAP) ou d'autres engrains granulaires basés sur le phosphate d'ammonium. Expressément, le procédé et les équipements ont été conçus pour la production des engrains granulaires NP, ASP et NPK ayant une composition nitrogène P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – K<sub>2</sub>O. La capacité de conception pour la production de DAP est de 120 tonnes par heure.[8]

La fabrication des engrais azotés consiste à une neutralisation des acides phosphorique ce qui donne lieu à une réaction de neutralisation exothermique.

Toutefois l'instabilité du phosphate triammonique  $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$  dans les conditions de fabrication amène à limiter la neutralisation par contrôle analytique du rapport molaire :

$$\text{RM} = \frac{\text{NombredemoledenH3}}{\text{NombredemoledenH3P04}}$$

Le procédé consiste à effectuer la neutralisation en deux étapes :

- Une pré-neutralisation de l'acide phosphorique par  $\text{NH}_3$  jusqu'à un RM = 1,4 pour le DAP et RM=0,6 pour le MAP ce qui correspond à une fluidité maximale de la bouillie et des pertes moindre en ammoniac par tension de vapeur. Cette première étape s'effectue dans un réacteur pré-neutraliseur PN agité de volume 80m<sup>3</sup>.
- Une ammonisation complémentaire jusqu'à obtention d'un RM = 1,8 pour DAP et RM = 1 pour le MAP, ce qui favorise la cristallisation. Ce deuxième stade est réalisé dans un tambour de granulation appelé granulateur.

### 2. Pré-neutraliseur (PN) :

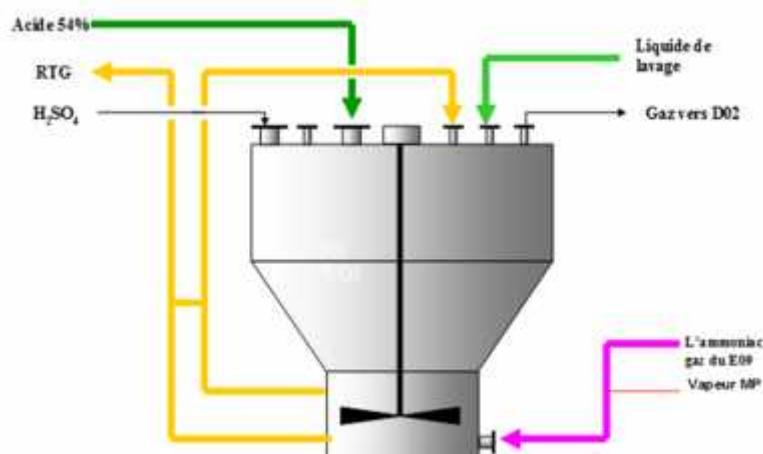


Figure 1 : Le pré-neutraliseur

C'est une cuve d'inox cylindrique vertical de volume 64,1m<sup>3</sup> où ont introduit l'acide phosphorique 54%, l'acide sulfurique, le liquide de lavage et l'ammoniac gazeux. Le mélange est agité par un agitateur vertical qui favorise l'homogénéisation du produit, il comporte un Système de Pulvérisation d'Ammoniac (huit tubes de pulvérisation d'ammoniac) pour réaliser un bon contact avec l'acide phosphorique.

Le principe de la fabrication consiste à produire un mélange de phosphate d'ammonium et sulfo-phosphate d'ammonium par neutralisation des acides phosphorique et sulfurique par l'ammoniac suivant les réactions.

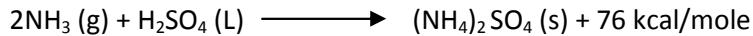
## Rapport de stage

- Neutralisation de l'acide phosphorique :



Le rapport molaire, pour cette 1<sup>ere</sup> ammonisation, doit être d'environ 1,4 pour le DAP et 0.6 pour le MAP.

- Neutralisation de l'acide sulfurique



L'acide sulfurique ajouté à ce mélange réagira avec l'ammoniac pour former les sulfates d'ammonium. Etant un acide plus fort que l'acide phosphorique, l'acide sulfurique à une plus grande affinité pour réagir avec l'ammoniac pour ajuster la qualité du produit, il fait baisser le pourcentage du P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> du produit fini. On ajoute l'acide phosphorique 29% pour régler la densité de la bouillie.

On constate que la chaleur dégagée aux deux stades de la réaction élève la température de la bouillie à environ 120°C, et provoque l'évaporation de la plus grande quantité d'eau introduite du fait de la dilution de l'acide phosphorique. Ainsi que toute la masse gazeuse -dégagée du PN et du granulateur- est récupérée pour subir un lavage au niveau de la section de lavage afin d'améliorer le rendement en NH<sub>3</sub> en récupérant l'ammoniac non réagit au cours des deux étapes de neutralisation.

### 3. Granulation :

La fonction du système de granulation est la transformation de la bouillie en engrais granulaire avec une composition et taille exigées. La granulation se produit dans un granulateur (tambour rotatif) où la bouillie de phosphate est pulvérisée sur le lit de recyclage sec retourné par le convoyeur des fines. Le mouvement de rotation du granulateur aide à distribuer, de façon uniforme, la bouillie sur la surface des granules, et par la recirculation, il produit des granules très uniformes, durs et bien arrondis.

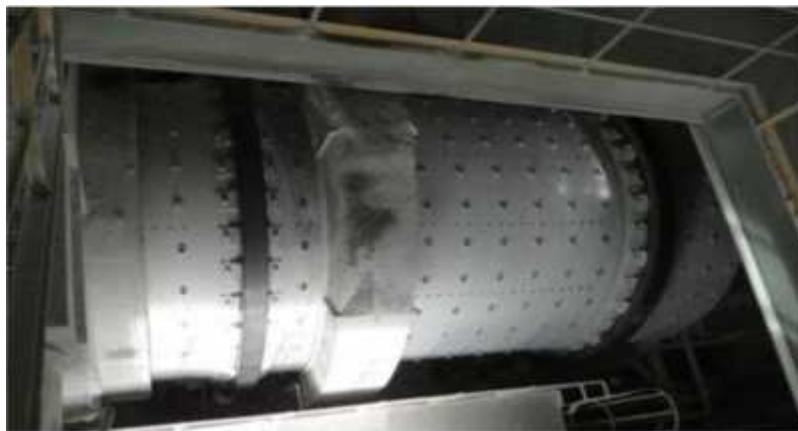


Figure 2 : Le tambour du granulateur

Le complément d'ammonisation, pour avoir la formule finale du DAP, est effectué dans le granulateur au moyen de la rampe d'ammonisation. Le rapport molaire atteint une valeur de 1,8. Les gaz du granulateur sont aspirés par un ventilateur vers la section de lavage.

## 3.1. Principales composantes

La configuration d'un granulateur est présentée ci-dessous. Il s'agit d'un tambour incliné de 3,6° afin de favoriser l'écoulement des granules par gravité. Il comporte essentiellement :

- Une virole tournante : qui aide à distribuer de façon uniforme la bouillie sur la surface du produit recyclé.
- Un arroseur d'ammoniac : c'est une rampe maintenue par un minimum de supports lourds qui pulvérise l'ammoniaque liquide.
- Une paroi intérieure : Elle est constituée des panneaux en caoutchouc flexibles pour éviter le colmatage du produit.
- Un racleur : actionné par un cylindre d'air, il est conçu pour éviter l'accumulation sur le tuyau de support de l'arroseur d'ammoniac.
- Un RTG: est un réacteur tubulaire de granulateur, il est situé sur le tuyau de support et équipé de 4 pulvérisateurs à jet conique creux de 90° qui aident à distribuer la bouillie. Ce réacteur est alimenté par la bouillie venant du pré-neutraliseur, l'acide phosphorique 54% et l'ammoniac gazeux, on peut utiliser le RTG sans le pré-neutraliseur.
- Système de Ventilation : pour aspirer les échappements des gaz.

Cet équipement muni d'un réacteur tubulaire (RTG) et d'un arroseur d'ammoniac (rampe d'ammonisation), Ces composantes sont conçues de façon à éviter l'accumulation de gros morceaux d'engrais.

La paroi intérieure du tambour est recouverte de panneaux en caoutchouc flexible et le granulateur fonctionne sous pression négative permettant à ces panneaux de se décoller de la paroi lors de la rotation et donc de briser les gros morceaux d'engrais pouvant s'y accumuler.

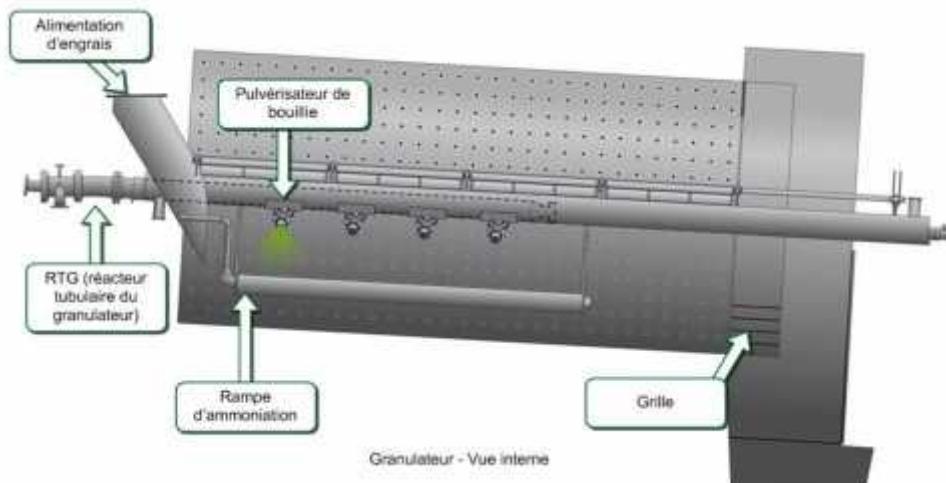


Figure 3 : Vue interne du granulateur

## 3.2. Principe de granulation

L'étape de granulation permet de transformer la bouillie en engrais granulaire quand la bouillie est pulvérisée sur un lit d'engrais recyclé et arrosée d'ammoniac liquide. La réaction d'ammonisation débutant dans le pré-neutraliseur est complétée dans le granulateur pour donner un rapport molaire de 1,86 à la sortie du granulateur.

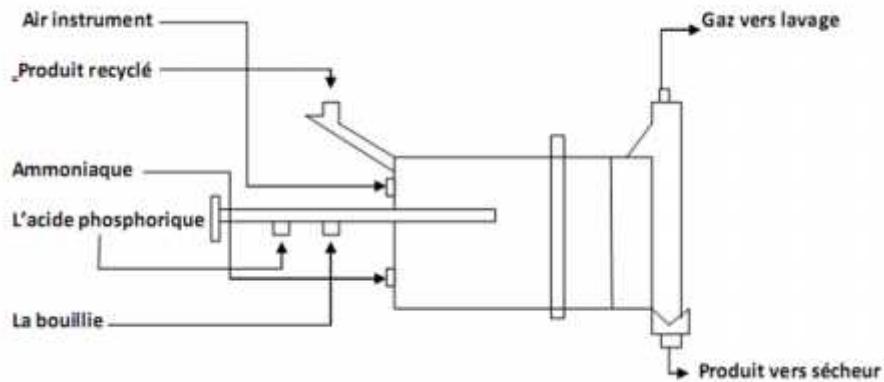


Figure 4 : les effluents du granulateur

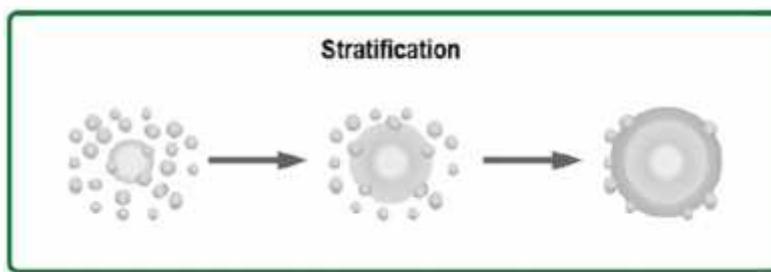
La granulation progresse de trois façons différentes : la nucléation, la stratification et l'agglomération. Ces étapes se produisent en série et en parallèle.

- **la nucléation**

La réaction d'ammonisation se poursuit au niveau du granulateur et fait progresser le rapport molaire au-dessus de 1,45. Cette réaction exothermique entraîne l'évaporation partielle de l'eau, diminuant ainsi la solubilité du DAP et provoquant la cristallisation du produit. Ce processus de cristallisation, connu sous le nom de nucléation, forme des noyaux qui sont critiques pour la granulation.

- **La stratification**

C'est un processus d'augmentation de la taille et de la masse des granules par le recouvrement des granules existants avec de la nouvelle matière.



L'engrais recyclé acheminé au granulateur est à l'origine du processus de stratification. La nouvelle matière provenant de la bouillie d'engrais est pulvérisée à travers la buse du RTG et se heurte contre les granules d'engrais recyclés en augmentant leur diamètre.

Le processus de nucléation et de stratification continue tout au long du tambour du granulateur.

De l'ammoniac liquide injecté sur le lit du granulateur réagit avec les noyaux et la bouillie recouvrant les granules pour produire une nouvelle couche d'engrais. Lors de la production de DAP, la bouillie sous forme de MAP est transformée en DAP, augmentant ainsi le rapport molaire de 1,45 à 1,86. La chaleur de la réaction, provoquée par l'addition d'ammoniac, permet la solidification de la nouvelle couche.

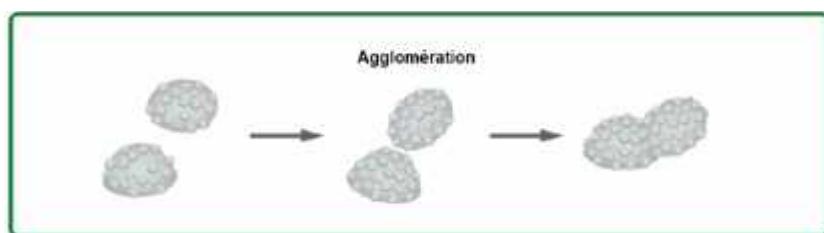
Le mouvement de rotation du tambour assure une distribution uniforme de la bouillie et de l'ammoniac sur la surface des granules afin de promouvoir la stratification.

## Rapport de stage

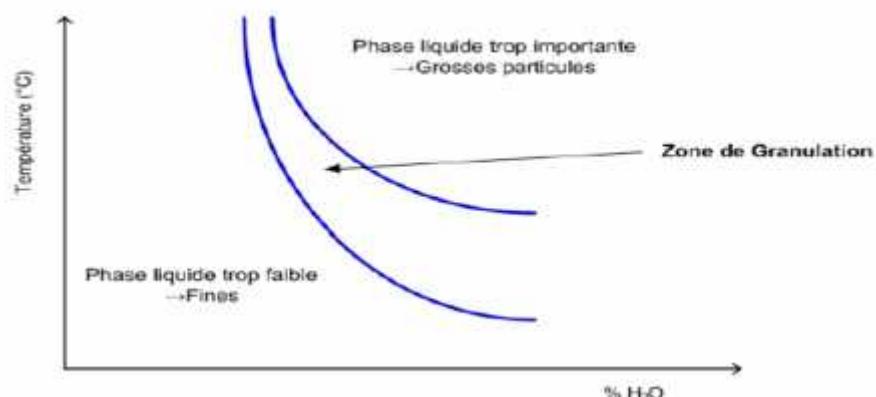
L'ammoniac est sous forme liquide afin de maximiser le temps passé dans le granulateur et le mouvement des granules dans le tambour produit des granules uniformes, durs et bien arrondis.

- **L'agglomération**

Elle se produit lorsque deux granules se heurtent pour former un seul granule de dimension et de masse supérieure. Ce processus est favorisé par le débit d'engrais alimenté au granulateur et la rotation du tambour qui provoque la collision entre les granules. La pulvérisation de la bouillie et des noyaux aide les granules à s'agglomérer ensemble lors de leurs collisions.



Le diamètre moyen des granules dépend de l'humidité (teneur en eau), de la température et du degré d'ammonisation. Le diamètre moyen augmente avec l'humidité et le ratio liquide/solide (bouillie/granules recyclés) dans le granulateur, et diminue avec le rapport molaire N/P.



*Figure 5 : La zone convenable pour la formation des grains*

- Une sur-ammonisation favorise la formation de fins, le dégagement et la perte d'ammoniac.
- Un manque d'ammoniac engendre : Produit trop humide, formation de mottes

### 4. Séchage :

#### 4.1. Les principaux composants :

Le sécheur est muni d'une chambre de combustion d'où sortent les gaz chauds destinés au séchage des granules dans le tambour rotatif. La chambre de combustion est alimentée par du fuel, de la vapeur d'eau pour l'atomisation et de l'air pour la combustion.

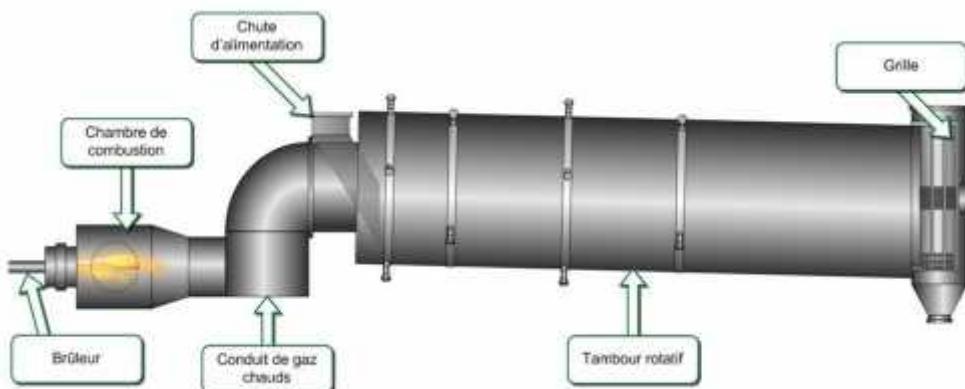


Figure 6 : les composants du sécheur

Le sécheur est divisé en deux parties :

⇒ **La chambre de combustion** : est équipée d'un revêtement réfractaire, un brûleur de la combustion de fuel oil et deux ventilateurs pour l'aspiration d'air de combustion et pour l'aspiration d'air de dilution qui permet de réduire la température de la masse gazeuse à l'entrée du sécheur afin d'éviter le risque de fusion du produit, aussi permet de maintenir une pression négative en fonction du débit de gaz aspiré par le ventilateur d'aspiration sécheur afin d'éviter que les gaz chauds ne s'échappent pas par l'entrée du sécheur.

Lors d'un démarrage, le propane est utilisé afin de préchauffer le brûleur et d'allumer le fuel, en premier lieu, le propane est allumé par arc électrique au niveau du brûleur et c'est la flamme du propane qui allume le fuel injecté au brûleur. Une fois que le fuel prend feu, le propane est arrêté automatiquement.

La chambre de combustion atteint des températures très élevées. Pour minimiser les pertes de chaleur et protéger le personnel ainsi que l'équipement, la chambre de combustion et les composantes connexes sont constituées de plusieurs couches de matériaux isolants. La chambre de combustion et les brûleurs sont en acier au carbone.

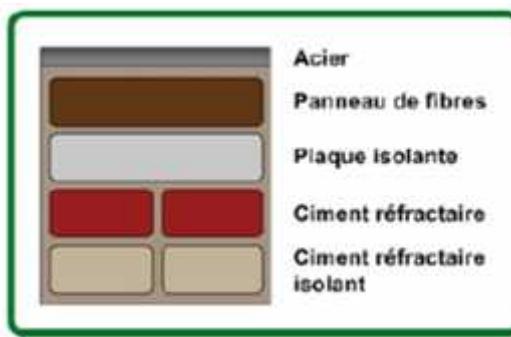


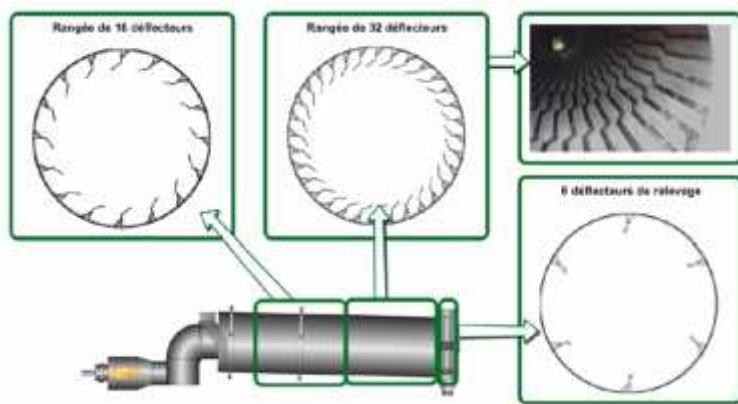
Figure 7 : Matériaux de la chambre à combustion

⇒ **Le tube sécheur** : est un tambour rotatif équipé intérieurement par des palettes relevées qui favorisent l'écoulement du produit sous forme de pluie afin d'assurer l'échange thermique, entraînant le produits vers l'avant. Il permet d'abaisser le pourcentage d'eau des granules de 3-4 % à 1,0-1,5 %.

## Rapport de stage

Le tambour du sécheur est muni de plusieurs types de déflecteurs (ou « spires »), à l'entrée du tambour, permettent de faire avancer rapidement le produit dans le sécheur.

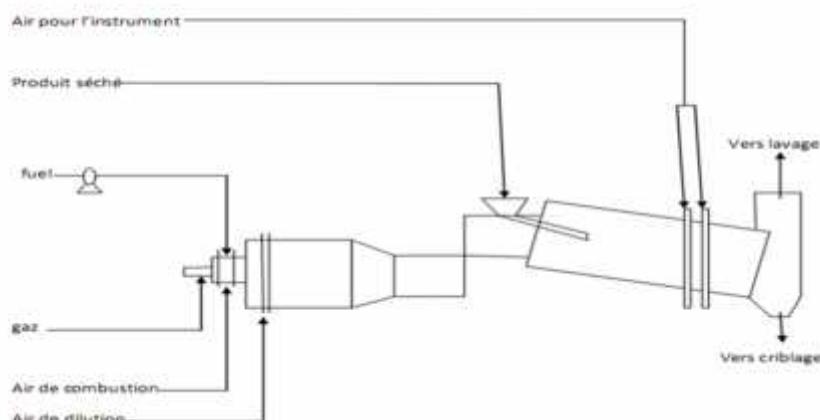
Une série de 16 et de 32 déflecteurs (ou « pelles ») soulèvent et laissent tomber les granules sur toute la longueur du sécheur pour ainsi optimiser les échanges de chaleur. À la sortie du sécheur, les déflecteurs de relevage (ou « grilles de relevage ») en forme de grille permettent de désagglomérer les mottes des produits séchés et de martiaux afin d'empêcher les granules d'engrais de rester collées contre les parois.



*Figure 8 : Les déflecteurs du sécheur*

### 4.2. Principe de procédé :

L'opération de séchage consiste à débarrasser le produit d'une partie de son eau, afin d'éviter les phénomènes de colmatage des appareils de broyage, criblage et conditionnement ainsi que la prise en masse au cours du stockage de l'engrais.



*Figure 9 : Sécheur*

Les solides alimentant le sécheur sont soulevés par des pelles relevées puis tombent en cascade à travers un flux co-courant d'une masse gazeuse provenant de la chambre à combustion. À la sortie du tube sécheur, les gaz chargés d'eau et de poussière sont traités au niveau d'une batterie de cyclones, pour récupérer le maximum de poussière qui sont recyclées vers le granulateur.

Les gaz chauds assurant le séchage de l'engrais proviennent d'un four sécheur constitué principalement d'une chambre de combustion à fuel.

## Rapport de stage

La sortie du sécheur est équipée d'un brise-mottes constitué des pelles releveuses fixées sur une grille tournante permettant effritement des mottes formées.

⇒ **les paramètres de marche :**

- la température d'entrée gaz : environ 150°C à 200°C.
- la température de sortie gaz : 85°C
- la température de sortie produit : 82°C

### 5. Classification et broyage :

#### 5.1. Classification granulométrique :

La séparation granulométrique de l'engrais permet de fabriquer un produit marchant à la granulométrie requise entre 2 et 4 mm et d'extraire le produit de recyclage qui alimente le granulateur.

De ce fait l'unité de production est équipée de quatre cribles à doubles étages munis de moteurs vibrants, deux cribles finisseurs muni chacun de quatre moteurs vibrants ainsi que quatre broyeurs pour broyer les sur-granulés. Pour améliorer l'efficacité du criblage, chaque crible est équipé d'un distributeur vibrant en assurant une répartition du produit sur toute la largeur du crible.

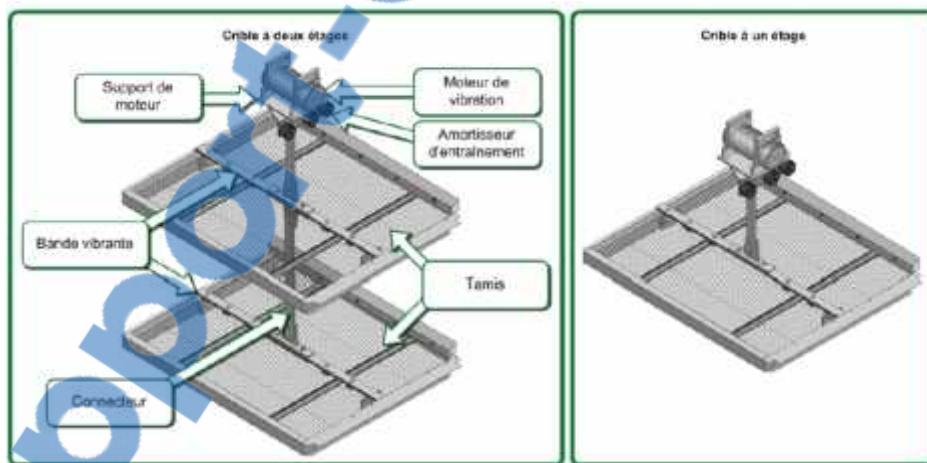


Figure 10 : Les composants d'un crible

• Les cribles primaires

Le rôle des cribles primaires, aussi appelés "cribles de séparation", est de séparer les granules provenant du sécheur rotatif en trois catégories selon leur taille : les particules grossières ( $> 4$  mm), les fines ( $< 2$  mm) et les granules détaille acceptable (entre 2 et 4 mm). Les cribles primaires sont des cribles à deux étages.

- Les cribles secondaires

Le rôle des cribles secondaires, aussi appelés "cribles de produits", est de séparer les granules de taille acceptable des particules trop fines (< 2 mm) provenant des cribles primaires. Les fines sont recyclées vers le granulateur. Les cribles secondaires sont des cribles à un étage.

- Les cribles finisseurs

Le rôle des cribles finisseurs du secteur refroidissement et enrobage est d'effectuer une dernière séparation pour ne conserver que les granules de taille commercialement acceptable. Les particules trop fines et trop grosses sont recyclées vers le granulateur. Les cribles finisseurs sont des cribles à deux étages.

**- Principe de fonctionnement :**

Les cribles ont une inclinaison fixe de 36 degrés. Cette inclinaison, combinée à l'action des moteurs vibrants, favorise le déplacement des particules le long du tamis (selon l'axe des « y » et en partie selon l'axe des « x ») et minimise le colmatage.

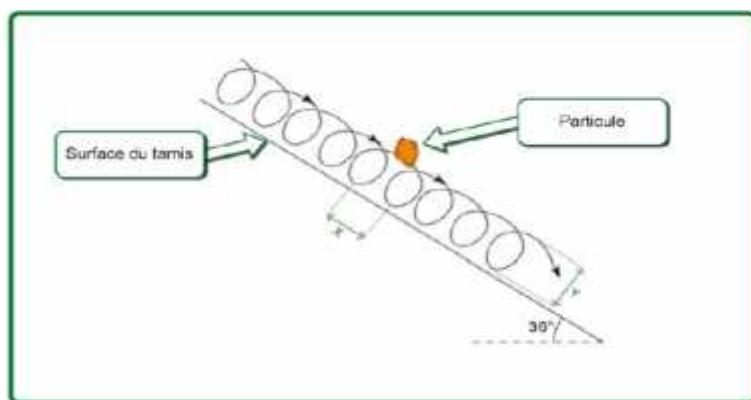


Figure 11 : Trajectoire circulaire d'une particule en mouvement sur la surface du tamis

## 5.2. Les broyeurs :

Les quatre broyeurs à chaînes sont identiques avec une capacité de conception de 75 tonnes/h et une température d'opération de 90°C.

Un broyeur à chaînes est constitué d'un caisson en acier contenant deux arbres horizontaux tournant à vitesse fixe et sur lesquels des chaînes montées sur des disques assurent le broyage des granules d'engrais. Ceux-ci sont alimentés par l'ouverture du haut et les fines obtenues tombent ensuite sur le convoyeur de fines. Les rotors tournent vers l'intérieur afin de propulser les particules vers le rotor opposé ce qui génère un plus grand nombre d'impact sur les granules passant à travers le broyeur. Une vitesse de rotation plus élevée requiert moins de chaînes et permet d'obtenir des granules de plus petit diamètre.

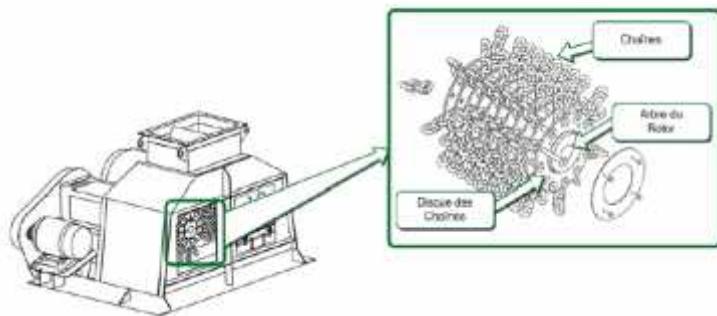


Figure 12 : Broyeur à chaînes

## 6. Le conditionnement du produit :

### 6.1. Le refroidissement :

Le rôle du refroidisseur est de refroidir les granules à une température d'environ 40 °C. Ceci permet d'éviter la formation de condensation lors du stockage des granules et donc de diminuer les risques de collage des granules. Ce refroidissement est réalisé par fluidisation avec de l'air. Il est équipé par un lit fluidisé rectangulaire en acier inoxydable percé de plusieurs trous de diamètre environ 1.5 mm, de l'air froid soufflé par des ventilateurs au-dessous du lit permet de fluidiser les grains d'engrais en les refroidissant, cette fluidisation permet également le déplacement du produit le long du refroidisseur.

### 6.2. L'enrobage :

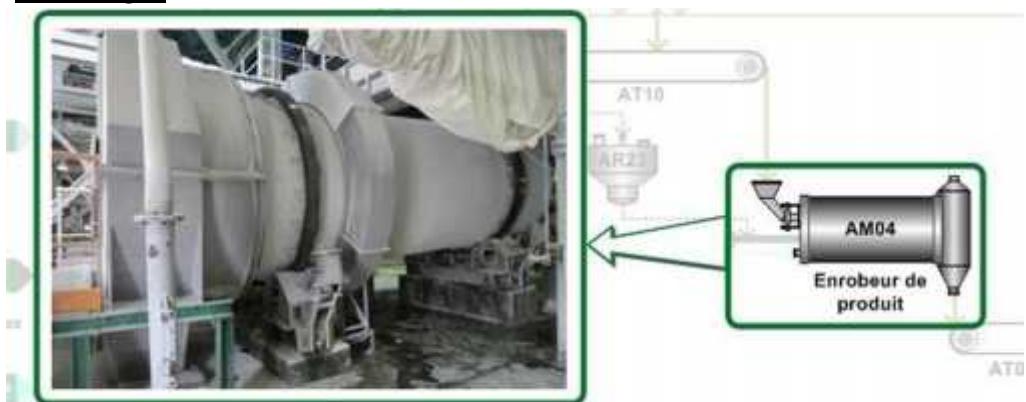
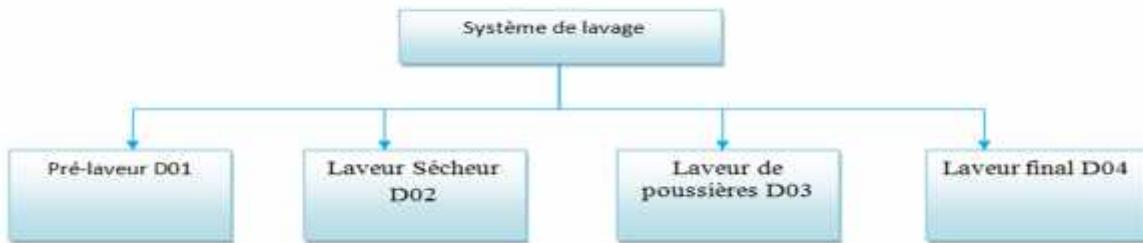


Figure 13 : L'enrobeur de produit

L'enrobeur de produit est un équipement cylindrique, horizontal et rotatif en acier dans lequel les granules sont tout d'abord mouillés par une pulvérisation d'huile d'enrobage. Ensuite, selon le type d'engrais, les granules peuvent être enrobés d'une mince couche de poussière d'enrobage. Ceci permet, de minimiser la formation d'agglomérats ou le collage de granules, car les granules d'engrais peuvent être entreposés pour de longues périodes tant à l'atelier d'engrais que chez le client. Il est important que les granules conservent leurs propriétés originales afin de répondre aux normes de qualité.

## 7. Système de lavage :

Le système de lavage selon le procédé de JACOBS dans la nouvelle ligne comporte quatre laveurs :



**Epurer les gaz dans le but de mettre un frein à la pollution** émise par les gaz sortant des solutions mise en réaction, peut être minimisée en lavant les gaz et les fumées rejetés dans l'atmosphère, les gaz contenant de l'ammoniac, des poussières et de la vapeur d'eau sortant des granulateur subissent un prélavage au niveau de la gaine du granulateur avant qu'ils se réunissent avec les gaz sortant du pré-neutraliseur pour se diriger vers une tour de lavage où une majeur partie de l'ammoniac est enlevée (à peu près de 70%) en réagissant sur l'acide phosphorique dans le liquide de lavage circulant à l'intérieur du laveur, les gaz du cyclone coulent vers le laveur sécheur pour l'enlèvement additionnel d'ammoniaque et de poussières par la solution de lavage circulante.

Après le premier lavage, les gaz subissent un deuxième lavage dans le laveur des gaz final pour récupérer l'ammoniac s'échappant de la tour de lavage.

L'air issu de la tour de lavage finale R/G est évacué vers l'atmosphère via une cheminée.

## 8. La vaporisation de l'ammoniac :

Le système de vaporisation de l'ammoniac est devisé en trois parties : Un système qui utilise des réfrigérateurs à air, autre qui utilise un évaporateur à vapeur et un échangeur qui utilise l'eau de lavage du tour.

Le réfrigérateur à air à deux rôles, le premier est de vaporiser une partie d'ammoniac liquide provenant de l'unité de stockage et l'autre est de refroidir l'air alimentant le refroidisseur. L'ammoniac bi-phasic sortant du réfrigérateur passe à travers un séparateur où il y a une séparation de l'ammoniac liquide-gaz. L'ammoniac liquide rejoint par suite avec le complément provenant de l'unité de stockage l'échangeur à eau de lavage ou l'évaporateur à vapeur basse pression qui vaporise totalement l'ammoniac liquide. Après sa sortie de l'évaporateur l'ammoniac gazeux rejoint celui sortant du séparateur pour alimenter le pré-neutraliseur.

## VI. Dimensionnement d'un réchauffeur de fuel lourd

### 1. Les caractéristiques du fuel lourd :

Le fuel est un combustible dérivé du pétrole, utilisé notamment dans les chaudières. Il est classé dans les ressources énergétiques fossiles et est impliqué dans la pollution de l'air.

Il existe deux types de fuel :

- Le fuel domestique est un combustible vendu pour les usages domestiques (chauffage) ou divers engins. On parle également de fuel oil domestique.
- Le fuel lourd est un des combustibles à haute viscosité souvent utilisés par les gros moteurs Diesel installés à bord des navires ou pour alimenter les centrales thermiques. Il est issu des



## Rapport de stage



coupes lourdes de la distillation du pétrole brut, s'ensuit une phase de distillation sous vide, une phase de viscoréduction et une phase de mélange et d'apports d'additifs.

Le fuel lourd contient toujours des impuretés plus ou moins nocives au bon fonctionnement des moteurs :

- Eau, en quantité assez élevée, ce qui nuit à l'auto-allumage des moteurs Diesel.
- Boues, ce qui affecte la qualité de la combustion et peut être dangereux pour les pompes d'injection.
- Soufre, dont la forte teneur provoque la corrosion des parois de la chambre de combustion et des soupapes d'échappement.

Par ailleurs, la grande viscosité du fuel rend l'injection à température ambiante impossible.

Pour ces raisons, plusieurs traitements sont nécessaires avant d'introduire des fuels lourds dans un moteur :

- Décantation permettant d'éliminer la boue et l'eau par gravité.
- Réchauffage (jusqu'à 90°C) pour faciliter la centrifugation.
- Centrifugation afin d'éliminer les impuretés solides et l'eau, complétée par une filtration.
- Réchauffage final (piloté par un contrôleur de viscosité) afin d'obtenir la viscosité nécessaire pour l'injection.

Le fuel est une substance organique dont les principales molécules sont composées de carbone (C) et d'hydrogène (H), d'où le nom d'hydrocarbure. Ces composés sont en d'innombrables proportions et leur combustion est à chaque fois différente.

Le carburant utilisé est le fuel lourd N°2 dont la composition est la suivante :

Constituants	C	H	S	H <sub>2</sub> O
Composition en % (massique)	86	10	3	1

Le fuel à l'état liquide ne brûle pas. On doit donc le vaporiser (le gazéifier). Pour ce faire il va être atomisé en toutes petites gouttelettes et mélangé à l'air comburant.

Il doit être chauffé à une température entre 120°C et 140°C pour que la combustion du fuel soit efficace et complète, et la vaporisation du fuel soit plus facile. Par conséquent, il y aura moins de pollution, et plus de chaleur. C'est le rôle du réchauffeur thermique, il maintient une température régulière d'environ 125°C. Ainsi, la viscosité est régulière, la taille des gouttes de fuel est régulière et le débit est régulier.

Ci-dessous les caractéristiques du Fuel N°2 :[7]

Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	970-1000
Point d'écoulement (°C)	36
Sédiments par extraction (% max)	0,25
Température d'inflammation (°C)	140
Viscosité à 80°C (Pa.s)	6, 305 10 <sup>-2</sup>
Pouvoir calorifique supérieur (Kcal/kg)	10500
Pouvoir calorifique inférieur (Kcal/kg)	9500
Chaleur spécifique (Kj/kg)	1,842
Conductivité thermique (W/m K°)	0,1442
Distillation à 70°C (%)	Max 50

## 2. Le brûleur :

Le brûleur permet de brûler le fuel dans la chambre de combustion pour produire les gaz chauds nécessaires au séchage des granules. Les principales composantes du brûleur sont illustrées dans la vue en élévation ci-dessous.

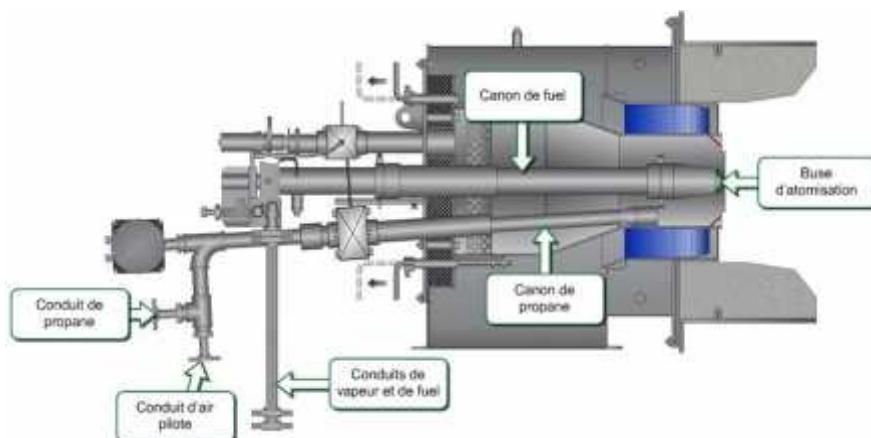


Figure 14 : Les principaux composants du brûleur

Lors d'un démarrage, du propane est utilisé pour préchauffer la chambre de combustion à la température requise, c'est-à-dire 140°C, et allumer le fuel pour produire les gaz chauds.

Dans la chambre de combustion, une buse d'atomisation fixée au bout du canon permet d'atomiser le fuel à l'aide de vapeur d'eau.

Le brûleur est muni d'un système de contrôle appelé BMS (Burner Management System). Celui-ci est utilisé pour réguler la combustion incluant : les débits de fuel, de propane (gaz pilote), d'air de dilution et d'air de combustion ainsi que la température des gaz chauds.

### 3. Les échangeurs thermiques :

#### 3.1. Description :

Un échangeur de chaleur est un système qui permet de transférer un flux de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid à travers une paroi sans contact direct entre les deux fluides. Le flux thermique traverse la surface d'échange qui sépare les fluides. Les mécanismes de transfert thermique utilisés sont : La convection forcée entre fluide chaud et paroi, la conduction à travers la paroi, la convection libre ou forcée entre paroi et fluide froid. D'autre part, l'un des fluides peut subir un changement de phase (condensation – vaporisation-ébullition). [1]

Exemples : radiateur d'automobile, évaporateur de climatiseur...

La plupart du temps, on utilise cette méthode pour refroidir ou réchauffer un liquide ou un gaz qu'il est impossible ou difficile de refroidir ou chauffer directement, par exemple l'eau d'un circuit primaire de refroidissement, d'une centrale nucléaire.

#### 3.2. Théorie des échangeurs :

Le dimensionnement des échangeurs repose principalement sur un calcul de bilan thermique. La puissance  $P$  d'un échangeur peut s'écrire de la manière suivante :

$$P = K S \Delta T_m \quad (1)$$

$K$  est le coefficient de transmission thermique surfacique moyen,  $S$  la surface d'échange et  $\Delta T_m$  représente l'écart de température moyen entre les deux fluides. On est obligé de raisonner sur des valeurs moyennes de  $K$  et de  $\Delta T_m$  dans la mesure où les températures des deux fluides et le coefficient  $K$  varient d'un endroit à l'autre de l'échangeur.[3]

L'approche théorique est réalisée en régime permanent et en faisant les hypothèses suivantes :

- L'échangeur est parfaitement isolé de l'extérieur (pas de pertes), on néglige la conduction axiale.
- Les coefficients  $K$  et  $Cp$  sont constants.
- La température de chaque fluide est homogène dans une section donnée.

L'équation (1) peut ainsi s'écrire :

$$P = K S \Delta T_m = Q_c C_p_c (T_{ce} - T_{cs}) = Q_f C_p_f (T_{fs} - T_{fe}) \quad (2)$$

Où  $Q$  représente le débit massique (Kg/s) et  $Cp$  la chaleur spécifique (J/kg.K).

Les indices  $f$  et  $c$  sont relatifs aux fluides froid et chaud et les indices  $s$  et  $e$  à l'entrée et à la sortie de l'échangeur.

La résolution de cette équation dépend du type d'échangeur considéré ; nous allons commencer par les plus simples, c'est à dire à courant parallèles.

##### i. Echangeurs à courants parallèles :

On considère les cas des échangeurs à courants parallèles et de même sens (anti-méthodiques ou à co-courant) et ceux de sens contraire (méthodiques ou à contre-courant).

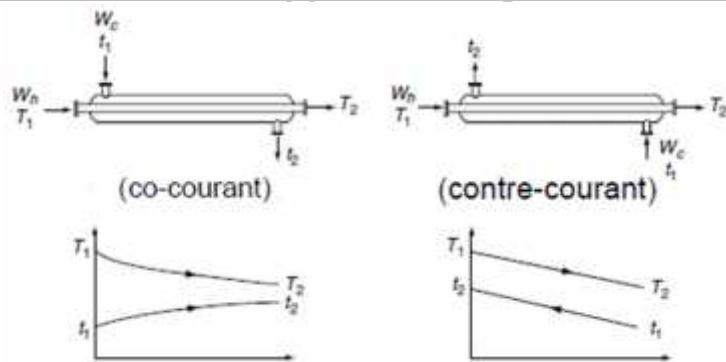


Figure 15 : évolutions des températures le long d'échangeurs à courants parallèles

Dans ces deux configurations, il est impossible en faisant un bilan thermique sur une tranche élémentaire, puis en intégrant sur toute la longueur de l'échangeur, de calculer l'écart de température moyen entre les fluides chaud et froid.

On trouve ainsi :

	Co-courant	Contre-courant
$\Delta T_m$	$\frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln\left(\frac{(T_1 - t_1)}{(T_2 - t_2)}\right)}$	$\frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}\right)}$

On appelle  $\Delta T_m$  l'écart logarithmique moyen et on le note DTLM.

Pour une puissance connue, si on fixe les débits et les températures d'entrée, on a 3 équations et 4 inconnues qui sont  $S$ ,  $K$ ,  $T_{fs}$  et  $T_{cs}$ ; il faut donc calculer séparément  $K$ .

### Calcul du coefficient K [4]

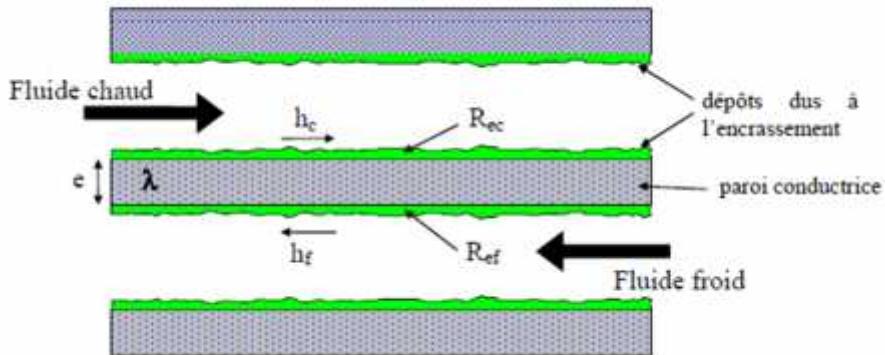


Figure 16 : Schéma de principe d'un échangeur de chaleur

Si on suppose que les transferts de chaleur entre le fluide et la paroi d'épaisseur  $e$  et de conductivité thermique  $\lambda$ , se font essentiellement par convection,  $K$  peut s'écrire de la manière suivante :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f} + R_{ec} + R_{ef} \quad (3)$$

## Rapport de stage

$H_c$  et  $h_f$  sont calculés avec les formules de convection forcées pour des températures de fluides moyennes et  $R_{ec}$  et  $R_{ef}$  sont les résistances thermiques d'encrassement dont les valeurs typiques sont données dans le tableau suivant :

FLUIDES	Valeurs moyennes de $R_e$ ( $m^2 K/W$ )
eau de mer $T < 50^\circ C$	$10^{-4}$
eau de mer $T > 50^\circ C$	$2.10^{-4}$
eau de rivière « sale »	$10 \text{ à } 20.10^{-4}$
eau industrielle	$2.10^{-4}$
vapeurs non grasses	$10^{-4}$
air industriel	$4.10^{-4}$
liquide réfrigérant	$4 \text{ à } 6.10^{-4}$
gas-oil	$2.10^{-4}$

Tableau 2 : Résistances d'encrassement

### ii. Echangeurs à courants croisés :

Dans ce cas, le problème est beaucoup plus complexe car les températures de sortie sont variables selon la position du fluide dans l'échangeur. Plusieurs configurations sont possibles selon que chaque fluide est libre de se mélanger (fluide brassé) ou bien au contraire est canalisé (fluide non brassé).

Bien que l'expression de  $\Delta T_m$  ait été calculée pour certains cas, on utilise souvent des abaques donnant un coefficient correctif  $F$  tel que :  $P = K S F \Delta T_m$  (4)

$F$  est donné par les abaques ci-dessous et  $\Delta T_m$  est calculé comme pour un échangeur à courant parallèle et de sens contraire.

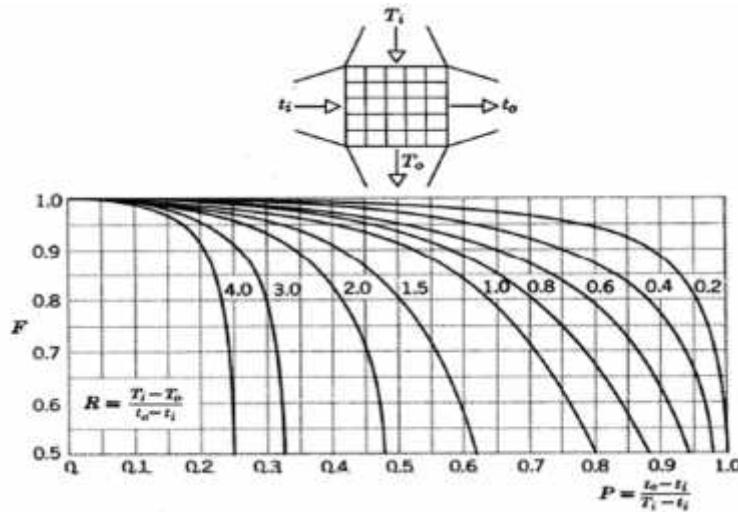


Figure 17 : Echangeur à courants-croisés – 2 fluides brassés

### iii. Méthode des NUT :

Dans certains cas, la méthode du DTLM requiert un calcul itératif. La méthode des NUT permet par contre le plus souvent un calcul direct.

Elle repose sur la notion d'efficacité, notée  $\epsilon$  et définie de la manière suivante :

$$\epsilon = \frac{\text{Puissance réelle}}{\text{Puissance maximale}} = \frac{P}{P_{max}} \quad (5)$$

La puissance maximale  $P_{max}$  peut s'écrire :  $P = C_{min}(T_{ce} - T_{fe})$

Avec  $C_{min}$  est la valeur minimale entre  $Q_c C_{pc}$  et  $Q_f C_{pf}$ .

On trouve ainsi :

$$\epsilon = \frac{Q_c C_{pc} (T_{ce} - T_{cs})}{C_{min} (T_{ce} - T_{fe})} \quad (6)$$

On démontre assez facilement que pour des échangeurs à courants parallèles, l'efficacité est essentiellement fonction de deux paramètres NUT et R définis de la manière suivante :

$$R = \frac{C_{min}}{C_{max}} \leq 1 \quad (7)$$

$$NUT = \frac{K S}{C_{min}} \quad (8)$$

L'efficacité n'est fonction que des caractéristiques physiques de l'échangeur et donc si on se fixe sur une surface, le calcul des températures de sortie est direct grâce à l'équation (6).

On pourrait penser que cet avantage par rapport à la méthode du DTLM est mineur si on prend en considération le développement actuel du calcul formel et des solveurs de plus en plus utilisés ; toutefois, l'expérience montre que ces outils ont souvent des difficultés avec la fonction DTLM, l'approche NUT étant plus stable.

On peut également utiliser des abaques qui donnent directement  $\epsilon$  en fonction de NUT.

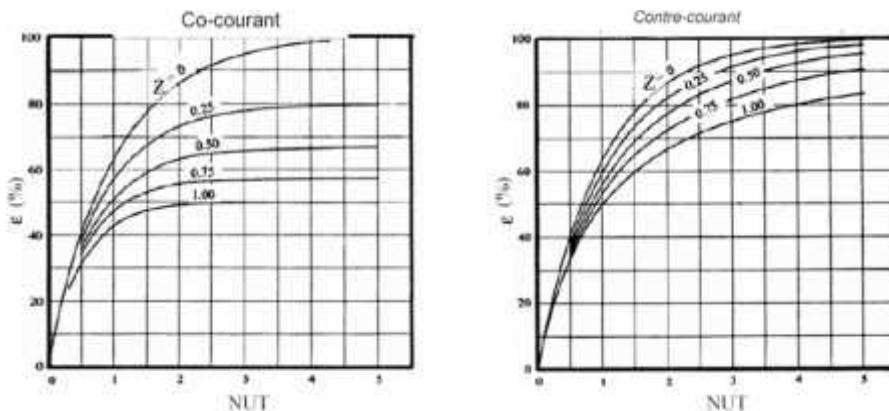


Figure 18 : Efficacité d'un échangeur à co-courant et à contre-courant en fonction de NUT et de R

En pratique, il suffit de disposer d'une série de relations correspondant aux configurations d'écoulement représentatives des échangeurs étudiés, et le dimensionnement d'un échangeur se fait sur la base, d'une part des équations de bilan, et d'autre part de la relation  $\epsilon = f$  (NUT, R, configuration d'écoulement).

### 3.3. Types d'échangeurs thermiques :

- **Echangeur tubulaire :**

L'échangeur tubulaire est un dispositif permettant le transfert de la chaleur entre deux fluides grâce à un design compact qui consiste à l'installation d'un faisceau de tubes de diamètre réduit dans une calandre de grand diamètre.

Cet appareil est largement utilisé pour toute application avec un grand flux de chaleur, et des débits assez importants des fluides d'échange. De plus l'échangeur à faisceau tubulaire se caractérise par sa facilité de maintenance, ce qui représente un avantage indéniable dans le choix et la sélection du type d'échangeur pour différents processus industriels.

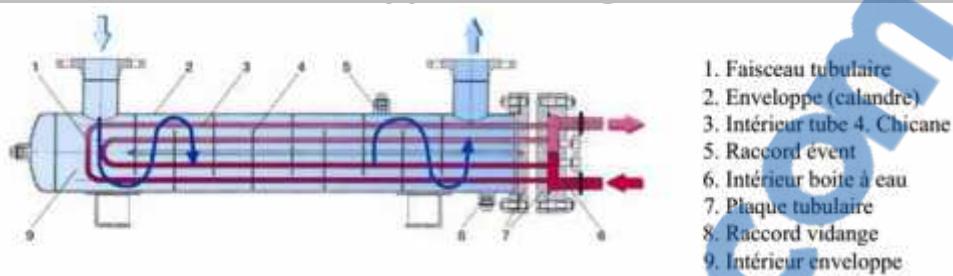


Figure 19 : Vue interne d'un échangeur tubulaire

- **Echangeurs à plaques :**

L'échangeur à plaques est un type d'échangeur de chaleur qui connaît un usage croissant dans l'industrie. Il est composé d'un grand nombre de plaques disposées en forme de millefeuilles et séparées les unes des autres d'un petit espace (quelques millimètres) où circulent les fluides. Le périmètre des plaques est bordé d'un joint qui permet par compression de la structure d'éviter les fuites.

Les plaques ne sont pas plates, mais possèdent une surface ondulée selon un schéma bien précis afin de créer un flux turbulent synonyme d'un meilleur transfert de chaleur, mais permet également de canaliser les fluides se déplaçant à la surface vers les coins de la plaque. Le fluide se déplace, par exemple, du coin inférieur gauche vers le coin supérieur droit de la plaque, où un orifice lié à un tuyau lui permet de passer de l'autre côté de la plaque et de sauter une couche du millefeuille (un espace entre 2 plaques) avant de s'écouler à nouveau le long de la plaque suivante. Ainsi chaque fluide ne circule parallèlement à une plaque que tous les 2 espaces.

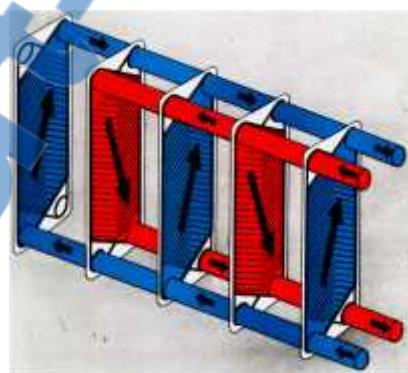


Figure 20 : Principe de fonctionnement d'un échangeur de plaques

L'avantage de ce type d'échangeur est sa simplicité qui en fait un échangeur peu coûteux et facilement adaptable par ajout/retrait de plaques afin d'augmenter/réduire la surface d'échange en fonction des besoins. La surface en contact avec l'extérieur est réduite au minimum, ce qui permet de limiter les pertes thermiques et l'étroitesse de l'espace où circulent les fluides ainsi que le profil des plaques assurent un flux turbulent qui permet un excellent transfert de chaleur.

Toutefois ces derniers paramètres entraînent une importante perte de charge qui limite le nombre de passage des fluides entre les plaques. Cette perte de charge ne peut être compensée par une pression d'entrée des fluides élevée (<2.5 MPa) car une trop grande pression causerait des fuites au travers des joints placés entre les plaques. La différence de températures entre les 2 fluides ne doit pas être trop grande également pour éviter une déformation des plaques par dilatation/contraction de ces dernières qui empêcherait les joints entre les plaques d'être parfaitement étanches.

La turbulence permet de réduire l'encrassement de la surface d'échange de 10-25 % par rapport à un échangeur à faisceau tubulaire. Comparativement à un échangeur à faisceau tubulaire la surface d'échange est inférieure de 50 % pour le même transfert de chaleur.

- **Echangeur à ailettes :**

Un échangeur à ailettes est un échangeur relativement simple : il consiste en un conduit cylindrique ou rectangulaire sur lequel sont fixées des lames métalliques de différentes formes. Le fluide de refroidissement est en général l'air ambiant. La chaleur est transférée du fluide chaud circulant dans le conduit principal aux lames métalliques par conduction thermique ; ces lames se refroidissent au contact de l'air.

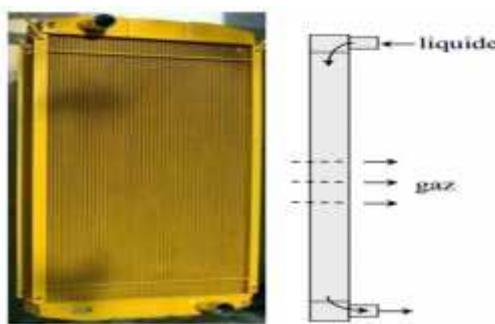


Figure 21 : Schéma échangeur eau/air d'automobile

Ce type d'échangeur est utilisé pour le chauffage dans les bâtiments : de l'eau est chauffée dans l'installation de chauffage et circule dans des radiateurs qui sont des échangeurs à ailettes. On utilise également ce type d'installation pour refroidir les moteurs de voiture ou encore les moteurs en tout genre. Dans ce dernier cas, la chaleur due aux frottements et à l'induction magnétique (cas d'un moteur électrique) est directement transférée à la protection extérieure du moteur qui possède des ailettes fixées à sa surface.

Le transfert thermique est limité notamment du côté du fluide de refroidissement par manque d'un système de circulation : l'air circule principalement par convection naturelle autour de l'échangeur. Cette limitation peut toutefois être supprimée par ajout d'un système de ventilation. Cet échangeur est très simple et peut prendre des formes particulières, ce qui le rend intéressant dans l'électronique.

#### 4. Description du problème :

La nouvelle ligne 107A, de production des engrais, utilise pour réchauffer le fuel N°2, des résistances électriques du type MidcomELW 6 – 42. La puissance d'un seul thermoplongeur égale à 2,1 kW. Près de la chambre de combustion, la nouvelle ligne possède un réchauffeur constitué de 9 de ces résistances qui fournissent une puissance de 18,9 kW.

La puissance fournie par les thermoplongeurs ne suffisait pas à chauffer le fuel N°2 à une température adéquate pour qu'il brûle. Ce qui a engendré une combustion incomplète au niveau de la chambre de combustion. Par conséquent, le coke s'est formé autour de l'entrée du fuel et il a endommagé le revêtement de la chambre. La couche de coke formé a empêché le fuel à s'introduire dans la chambre, et il a causé un retour du fuel au sein du brûleur et une flamme s'est déclenchée.

À cause de ce problème, 5 sur 9 des thermoplongeurs ont été endommagés et devraient être remplacé par des nouveaux. Le prix élevé de ces thermoplongeurs nous a obligés de trouver une nouvelle méthode pour réchauffer le fuel d'une manière plus efficace et moins coûteuse.

L'idée est de dimensionner un échangeur thermique à base de la vapeur basse pression, qui nous fournira une puissance suffisante à chauffer le fuel N°2 à la température nécessaire pour le brûler. Ce type de réchauffeur est utilisé dans les anciennes lignes. On va se baser sur son plan pour dimensionner un échangeur mais avec d'autres débits.

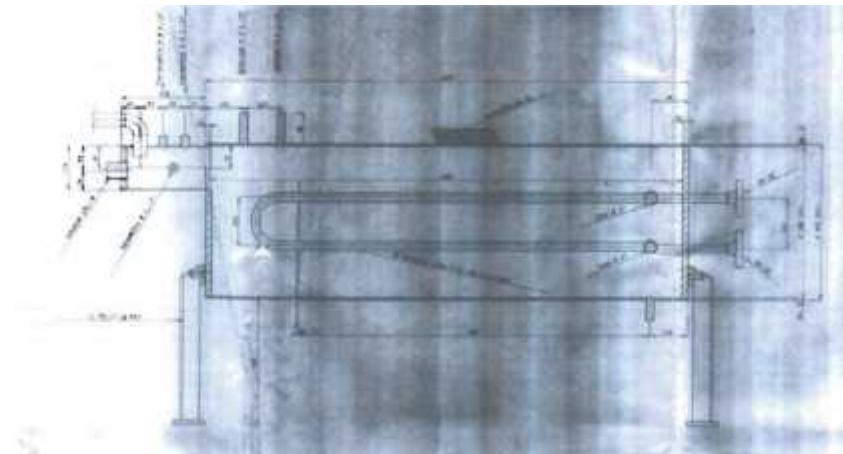


Figure 22 : Plan du réchauffeur de fuel dans les anciennes lignes

### 5. Dimensionnement du réchauffeur de fuel :

- Méthode de calcul :

Premièrement, il faut déterminer la puissance nécessaire pour chauffer le fuel d'une température de 80°C à 125°C.

Pour le faire on doit utiliser la formule suivante :

$$P = Q_{fuel} C_{fuel} \Delta T_{fuel}$$

Sachant que :  $Q_{fuel} = 1200 \text{ kg/h}$  et  $C_{fuel} = 1,842 \text{ Kj/kg.K}$

Application numérique :  $P = 1200 \times 1,842 \times (125-80)$

$$P = 99468/3600$$

$$P = 27,63 \text{ kW}$$

Le fluide chaud qu'on va utiliser est la vapeur à basse pression. Sa température est 160°C et sa pression est 4,5bar.

En utilisant la formule de Duperray, elle nous permettra de calculer la température de la vapeur saturante.

On a :  $P_s = \left( \frac{T_s}{100} \right)^4$

D'où :  $T_s = 100 \times \sqrt[4]{P_s}$

Avec  $P_s = 4,5 \text{ bar}$

Application numérique :  $T_s = 145,65^\circ\text{C}$

On a mesuré la température de sortie du condensat au niveau des anciennes lignes, et on a trouvé une valeur de 100°C. Du coup, on profitera de la chaleur dégagée lors de la condensation.

Pour calculer le débit de la vapeur à basse pression on a :

## Rapport de stage

$$P = Q_{vap} C_{p,vap} \Delta T_{vap} + Q_{vap} L_c$$

Données : [6]

$$C_{p,vap} = 2,3976 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Et } L_c = 506,09 \text{ Kcal/kg} = 2119,71 \text{ kJ/kg}$$

Donc :

$$P = Q_{vap} (C_{p,vap} \Delta T_{vap} + L_c)$$

$$Q_{vap} = \frac{P}{C_{p,vap} \Delta T_{vap} + L_c}$$

A.N :

$$Q_{vap} = \frac{99468}{2,3976 * (160 - 100) + 2119,71}$$

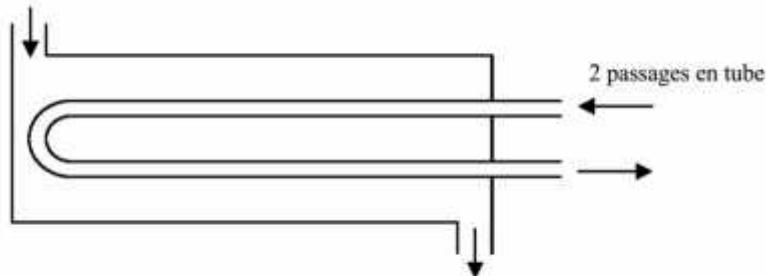
$$Q_{vap} = 43,943 \text{ Kg/h}$$

Connaissant les débits des deux fluides, leurs températures d'entrée et le flux à échanger, on utilise la méthode NUT compatible avec le type d'échangeur sur lequel on s'est basé.

L'échangeur thermique de type 1-2 est constitué d'un seul tube et de deux passages représenté sur la figure ci-dessous.

### Échangeurs tubulaires 1-2

1 passage en enveloppe



- 1er passage en tube à co-courant
- 2nd passage en tube à contre-courant

*Figure 23 : Schéma d'un échangeur de type 1-2*

On commence par calculer le rapport R entre les débits de capacité thermique des fluides :

$$R = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

Avec :

$$C_{min} = Q_{vap} C_{p,vap} = 43,943 \times 2,3976 = 105,358 \text{ Kg/h K}^\circ$$

$$\text{Et } C_{max} = Q_{fuel} C_{p,fuel} = 1200 \times 1,842 = 2210,4 \text{ Kg/h K}^\circ$$

Donc :

$$R = \frac{105,358}{2210,4}$$

$$R = 0,0476 \leq 1$$

On calcule l'efficacité  $\epsilon$  à partir de :

$$\epsilon = \frac{Q_c C_{p,c} (T_{ce} - T_{cs})}{C_{min} (T_{ce} - T_{fe})}$$

## Rapport de stage

$$\varepsilon = \frac{43,943 * 2,3976 * (160 - 100)}{105,358 * (160 - 80)}$$

$$\varepsilon = 0,75 = 75\%$$

D'après l'abaque relatif à l'échangeur 1-2 suivant :

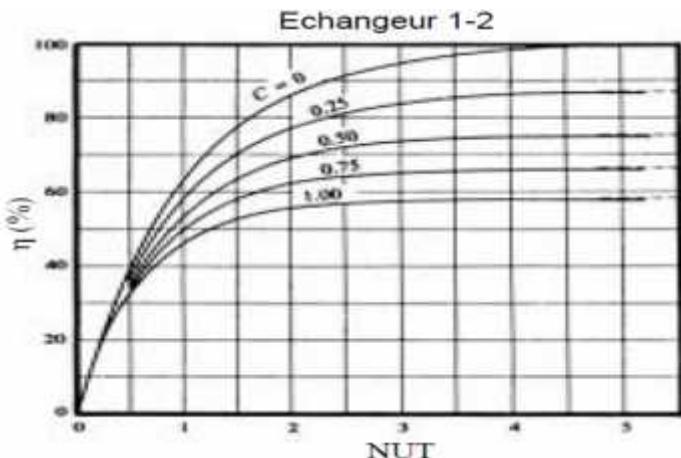


Figure 24 : Abaque  $NUT = f(\eta)$  pour l'échangeur 1-2[5]

On trouve la valeur NUT :

$$NUT = 1,48$$

Et on a :

$$NUT = \frac{KS}{C_{min}}$$

D'où :

$$KS = NUT \times C_{min}$$

$$KS = 1,48 \times 105,358$$

$$KS = 155,93$$

- Calcul du coefficient d'échange thermique global K :

La méthode des NUT que nous avons utilisés, ne fournit que le produit « KS » du coefficient global d'échange par la surface d'échange, sans que les deux termes soient évalués séparément.

Pour pouvoir dimensionner l'échangeur, c'est-à-dire calculer sa surface, il faut d'une part choisir sa configuration géométrique, pour calculer le coefficient global d'échange K, qui dépend de cette configuration et des propriétés thermo-physiques des fluides.

Pour les tubes notre choix est opté pour l'acier noir. Il se présente comme un choix convenable à l'usage de cet échangeur, vu que la vapeur d'eau circulant dans le tube se caractérise par son aspect non corrosif, ce qui nous permet de choisir un matériau avec des couts de fabrication moins élevés.

En outre, d'après le tableau des diamètres des tubes et leurs épaisseurs fourni par le tableau ci-dessous, une valeur de e=2mm était choisi comme épaisseur moyenne des tubes, une valeur bien tolérée et qui permet d'avoir un bon coefficient de transfert de chaleur.[2]

## Rapport de stage

Dext (mm)	Epaisseurs des tubes (mm)				
	1,2	1,6	2	2,6	3,2
16	1,2	1,6	2	-	-
20	-	1,6	2	2,6	-
25	-	1,6	2	2,6	3,2
30	-	1,6	2	2,6	3,2
38	-	-	2	2,6	3,2
50	-	-	2	2,6	3,2

On calcule le coefficient d'échange globale K en utilisant la relation suivante :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_c} + \frac{\epsilon}{\lambda} + \frac{1}{h_f} + R_{ec} + R_{ef}$$

Le coefficient d'échange par convection du fluide  $H_c$  circulant à l'intérieur des tubes d'un échangeur de chaleur peut être calculé avec une corrélation de la convection. Le nombre de Nusselt est à calculer à partir du nombre de Reynolds et le nombre de Prandtl. Avec le nombre de Prandtl est :

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda}$$

$\mu$  : la viscosité du fluide. (Pa.s)

$C_p$  : capacité thermique massique.(Kj/kg K)

$\lambda$  : la conductivité thermique. (W/m K°)

Pour calculer le coefficient d'échange côté calandre, on utilise la méthode KERN. Cette méthode est largement adoptée dans la conception des échangeurs thermiques. Le coefficient de transfert est calculé à partir de la corrélation suivante :

$$\frac{h_0 D_e}{\lambda} = 0.36 R_e^{0.55} Pr^{0.33}$$

- Calcul du Pr pour les deux fluides :**

- Vapeur basse pression :

$$Pr_{vap} = \frac{\mu_{vap} * C_{p,vap}}{\lambda_{vap}}$$

$$Pr_{vap} = \frac{0,000014 * 2,3976}{0,0322}$$

$$Pr_{vap} = 0,001$$

- Fuel lourd N°2 :

$$Pr_{fuel} = \frac{\mu_{fuel} * C_{p,fuel}}{\lambda_{fuel}}$$

$$Pr_{fuel} = \frac{6,305 * 10^{-2} * 1,842}{0,1442}$$

$$Pr_{fuel} = 0,8$$



## Rapport de stage



- **Données géométriques du réchauffeur : (anciennes lignes)**

Caractéristiques des tubes :

Nombre de tubes	2
Nombre de passages	2
Diamètre externe (mm)	20
Epaisseur (mm)	2
Pas ou Pitch (cm)	38

Caractéristiques de la calandre :

Diamètre intérieur de la calandre (m)	0,535
Espacement des chicanes (mm)	100
Epaisseur chicane (mm)	2
Longueur de la calandre (m)	1,73

- **Calcul des coefficients de transfert :**

- Côté tube :

La vitesse massique de la vapeur dans le tube est :

$$G_t = \frac{Q_{vap}}{A}$$

A : est la section intérieure du tube.

$$A = \pi * \frac{D_i^2}{4} = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Donc :

$$G_t = 60,7 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

Le nombre de Reynolds est égale à :  $Re = \frac{D_{int} * G_t}{\mu_{vap}}$

$$Re = 69382,39$$

Re>10000, ce qui veut dire que le régime d'écoulement est turbulent. En utilisant la corrélation de Colburn, le coefficient d'échange est :

$$H_{vap} = \frac{\lambda_{vap}}{D_{int}} 0,023 Re^{0,8} Pr^{0,33}$$

$$H_{vap} = \frac{0,0322}{16 \cdot 10^{-3}} \times 0,023 \times (69750,79)^{0,8} \times (0,001)^{0,33}$$

$$H_{vap} = 1537,2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Le coefficient d'échange est corrigé par :  $H_{vap} = 1537,2 \times \frac{D_{interne}}{D_{externe}} = 1230 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$



## Rapport de stage



- Côté calandre :

Pour le calcul de la vitesse massique du fuel dans la calandre, cherchons tout d'abord la section de passage :

$$A = (P - d_{ext}) (E_c - e)$$

$$A = (0,38 * 0,02) (0,1 * 0,002)$$

$$A = 0,0352 \text{ m}^2$$

Donc :

$$V = \frac{Q_{fuel} * P}{\rho_{fuel} * D_{calandre} * A}$$

$$V = \frac{1200 * 0,38}{970 * 0,535 * 0,03528} = 24,9 \text{ m/s}$$

Le nombre de Reynolds est égale à :  $Re = \frac{\rho_{fuel} * V * d_{ext}}{\mu_{fuel}}$

$$Re = \frac{970 * 24,9 * 0,02}{6,305 \cdot 10^{-2}} = 7663$$

$$H_{fuel} = \frac{\lambda_{fuel}}{d_{ext}} 0,36 Re^{0,55} Pr^{1/3}$$

$$H_{fuel} = \frac{0,1442}{20 \cdot 10^{-3}} \times 0,36 \times (7663)^{0,55} \times (0,8)^{1/3}$$

$$H_{fuel} = 330 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- **Calcul du coefficient d'échange global :**

On a :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{h_c} + \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_f} + R_{ec} + R_{ef}$$

Avec l'épaisseur du tube égale à 2 mm. Le matériau qu'on a déjà choisi est l'acier noir qui a une conductivité thermique de 53,33 W/m.K.

Et les valeurs des résistances d'encrassement  $R_{fuel}$  et  $R_{vap}$  sont citées dans le tableau de référence.

$$K = \frac{1}{\frac{1}{H_{vap}} + \frac{1}{H_{fuel}} + \frac{e}{\lambda} + R_{vap} + R_{fuel}}$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{330} + \frac{1}{1230} + \frac{0,002}{53,33} + (10^{-4}) + (2 \cdot 10^{-4})}$$

$$K = 239 \text{ W/m}^2 \text{ K}$$

- **Calcul de la surface d'échange :**

D'après les calculs précédents on a déjà trouvé la valeur du produit KS, donc :

$$KS = 155,93$$

$$S = \frac{155,93}{239} = 0,65 \text{ m}^2$$

On sait que:

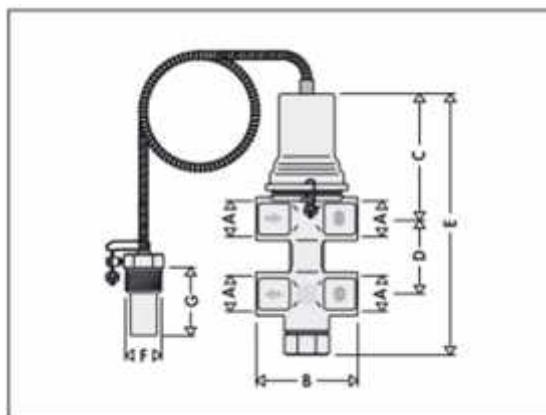
$$S = 2\pi R n_{\text{tubes}} L$$

Donc :

$$L = \frac{S}{2\pi R n_{\text{tubes}}} = \frac{0,65}{2\pi \cdot 0,016 \cdot 2} = 3,24 \text{ m}$$

## 6. Sécurité du réchauffeur du fuel :

Pour assurer la sécurité du réchauffeur, il doit être équipé d'une soupape. Son rôle est de protéger contre les surpressions dans le réchauffeur soumis à pression. L'enceinte peut être face à des variations de pression suite aux changements des débits, qui produira une augmentation de la pression.



*Figure 25 : Soupape de sécurité*

Lorsque la pression atteint un certain seuil dans le réchauffeur, une petite bille fermée par un ressort fait office de soupape de sûreté. Le ressort est taré de manière à libérer l'ouverture de la bille à une certaine valeur de pression admissible par le réchauffeur. Du coup, le fuel crachait par la soupape permet de chuter la pression, et éviter une surpression qui pourra causer une explosion du matériel.

Ainsi qu'un thermostat, il permettra de maintenir le système à une température relativement stable.

En plus, le réchauffeur doit avoir un thermomètre et un baromètre. Pour contrôler la température et la pression au sein du système.

Avant l'utilisation du réchauffeur, on doit faire un essai hydraulique pour vérifier s'il n'y a pas de fuite dans le tube ou bien la calandre.



## VII. Conclusion

Ce stage avait pour but de nous apporter une expérience professionnelle réelle en milieu industriel. En effectuant ce stage, on a pu avoir une idée détaillée sur le monde de travail sous tous ses aspects et cela nous a apporté une nouvelle vision de l'entreprise, tant au niveau de son organisation qu'au niveau humain.

La présente étude nous a sensibilisé sur l'importance de l'énergie thermique dans l'industrie et nous a permis de cerner les paramètres clés qui influencent la consommation spécifique de la vapeur au niveau du réchauffeur de fuel lourd N°2, ainsi que de faire une étude générale pour avoir un fonctionnement adéquat avec les exigences, il apparaît clairement que la nouvelle ligne de production des engrais est un champ riche pour les études thermique et énergétique.

Pour conclure, il est de bon sens de confirmer que le stage est désormais un acte concret non négociable et en plus il s'agit d'une opportunité si importante pour qu'un étudiant soit capable et apte de confirmer et comparer ses acquis théoriques avec les éléments et les exigences de la vie active.

### VIII. Références bibliographiques :

- [1] Bontemps A., Garrigue A., Echangeurs de chaleur, Définition et architectures générales, Traité génie énergétique. Techniques d'ingénieurs B 2 340.
- [2] Bontemps A., Garrigue A., Echangeurs de chaleur, Description des échangeurs, Traité génie énergétique. Techniques d'ingénieurs B 2 341.
- [3] Bontemps A., Garrigue A., Echangeurs de chaleur, Dimensionnement thermique, Traité génie énergétique. Techniques d'ingénieurs B 2 342.
- [4] Bourret B., Les échangeurs de chaleur, Département génie civil, INSA Toulouse.
- [5] Jannot Y., Cours de thermique : Transferts et Métrologie, 2005.
- [6][www.thermexcel.com/french/tables/vap\\_eau.htm](http://www.thermexcel.com/french/tables/vap_eau.htm)
- [7] Watlow, Properties of Liquids (PDF), Reference Data 135.
- [8] SNC-Lavalin, Formation survol de procédé.