



Licence Sciences et Techniques (LST)

GENIE CHIMIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

Bilan massique et thermique d'une unité de production d'engrais

Présenté par :

◆ Redouane FALOUS

Encadré par :

- ◆ Mr Abderrahim BENZAOUIA (Société)
- ◆ Pr Ouafae SQALLI (FST)

Soutenu Le 13 Juin 2013 devant le jury composé de:

- Pr O.SQALLI HOUSSAINI
- Pr H.BALI
- Pr EL.EL GHADRAOUI

Stage effectué à OCP

Année Universitaire 2012 / 2013

Introduction

Pour se développer les plantes ont besoin d'eau, de lumière, de carbone, d'oxygène et d'éléments minéraux. L'air fournit l'oxygène et le gaz carbonique, source du carbone, que la plante fixe grâce à la photosynthèse. Le sol sert de réserve en eau et en éléments minéraux pour alimenter la plante. Les besoins de la plante évoluent au cours de sa vie et à chaque stade de son développement. Les fertilisants approvisionnent le sol en éléments nutritifs.

Les matières fertilisantes sont des produits destinés à assurer la nutrition des végétaux ou à améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Elles comprennent les fertilisants minéraux (engrais) qui sont des produits dont la fonction majeure est d'apporter aux plantes des éléments nutritifs (éléments majeurs, éléments secondaires et oligo-éléments). Les fertilisants minéraux sont des substances solides, fluides ou gazeuses contenant un (engrais simple) ou plusieurs (engrais composés) éléments nutritifs majeurs (N,P,K) sous une forme inorganique.

Et par conséquent, l'office chérifien des phosphates se penche ces dernières années de plus en plus vers l'amélioration de la production des engrais phosphatés simple ou complexe.

Le stage effectué au sein de l'Office Chérifien des Phosphates « OCP » m'a permis :

- D'approfondir mes connaissances acquises au cours de ma formation.
- De suivre le procédé de fabrication des engrais au MAROC PHOSPHORE
- Etudier les performances des machines de production des engrais

Ce travail permet de faire une description de la section séchage et d'établir :

- Les technologies du séchage
- Bilan de matière de l'unité de production des engrais
 - ✓ Bilan massique de la section de séchage
 - ✓ Bilan thermique de la section de séchage
- Les actions pour améliorer l'opération de séchage

Chapitre I : Présentation générale

- Présentation de la société

- Généralité sur les engrais
- Description du procédé de fabrication des engrais

I. Présentation de la société

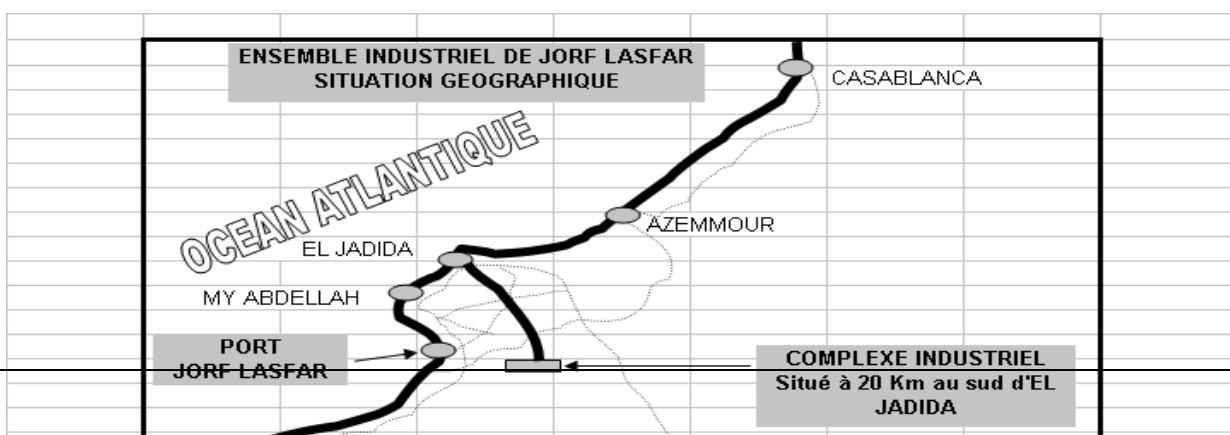
La production du phosphate brut se fait dans quatre centres miniers: Khouribga, Youssoufia, Benguerir et Boucraâ. Environ la moitié du phosphate produit est exportée comme matière première à destination d'une quarantaine de pays à travers le monde, tandis que l'autre moitié est livrée aux usines locales de transformation. Celles-ci sont dénommées Maroc Chimie I et II (SAFI), Maroc Phosphore I & II (SAFI), Maroc Phosphore III – IV, IMACID, Pakistan Maroc Phosphore et d'autres entreprises installées à JORF LASFAR.

1. Fiche technique de l'O.C.P

Raison sociale	Office chérifien des phosphates O.C.P.
Numéro du registre de commerce	Casablanca 40327
Date de création	Dahir du 07/08/1920
Mise en place de la structure du groupe	Juillet 1975
Siège sociale	Angle route d'El Jadida et BD de la Grande Ceinture, B.P 5196 Casa Maarif, Casablanca
Président directeur du groupe	Mr. Mostafa Terrab
Secteur d'activités	Extraction, valorisation et commercialisation des phosphates et produits dérivés

Tableau 1 : Fiche technique de l'O.C.P [1]

2. Le complexe chimique de JORF LASFAR



Après le complexe industriel MAROC PHOSPHORE I et II à Safi, le Groupe OCP a réalisé le complexe MAROC PHOSPHORE III-IV à Jorf LASFAR pour doubler sa capacité de valorisation des phosphates. Ce complexe, qui a démarré en 1986, permet de produire annuellement :

- 1,7 Millions de tonnes d'acides phosphoriques
- 1,8 Millions de tonnes équivalents d'engrais.

Cette production nécessite :

- ✓ 1,78 Millions de tonnes de soufre ;
- ✓ 6,3 Millions de tonnes de phosphates ;
- ✓ 0,41 Million de tonnes d'ammoniac.

Le complexe MAROC PHOSPHORE comprend plusieurs ateliers :

a) Atelier sulfurique

6 unités de production d'acide sulfurique monohydrate d'une capacité de 2650 t/j chacune utilisant le procédé à double absorption Mon santa (USA).

b) Atelier d'utilités

- ❖ Une centrale thermoélectrique avec trois groupes turboalternateurs de 37 MW chacun
- ❖ Un réservoir d'eau douce et une station de traitement de 2000 (m³/h)
- ❖ Une station de reprise d'eau de mer de 60000 (m³/h)
- ❖ Une station de compression d'air.

c) Atelier phosphorique

- ❖ huit unités de broyage de phosphate d'une capacité unitaire de 100t/h pour les trois unités fonctionnant selon le procédé Rhône-Poulenc (France) et d'une capacité de 150 t/h pour les cinq autres unités fonctionnant selon le procédé OCP
- ❖ huit unités de production d'acide phosphorique dont trois fonctionnent selon le procédé Rhône-Poulenc (France) d'une capacité unitaire de 500 t (P₂O₅)/j et cinq selon le procédé JORF LASFAR (OCP) d'une capacité unitaire de 700 t (P₂O₅)/j
- ❖ Décanteurs, désursaturateurs et bacs de stockage.

d) Atelier d'engrais

4 unités de production de DAP dont deux peuvent produire du TSP ,MAP et NPK .

- ❖ Capacité en DAP : 1400 t/j/unité.
- ❖ Capacité en TSP : 1100 t/j/unité.

- ❖ Capacité en MAP : 1200 t/j/unité.

II. Généralités sur les engrais

1. Définition 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 une forme stable dans la solution du sol. Ces engrais 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.

2. Rôle des principaux éléments constituant les engrais

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

- ❖ Éléments fertilisants secondaires : Le calcium, le magnésium, le soufre et le sodium.
- ❖ Oligo-éléments : bore, chlore, cuivre, magnésium, molybdène et le zinc.

Les oligo-éléments : Ils 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.

- ❖ Éléments fertilisants majeurs : L'azote le phosphore et le potassium :

- L'azote est l'élément fondamental de la matière vivante qui est également l'un des principaux constituants de la chlorophylle.
- Le phosphore favorise la croissance et le développement de la plante, ainsi que la rigidité des tissus et la résistance aux maladies.
- Le potassium participe à la synthèse des protéines et accroît la résistance de la plante aux parasites.

La combinaison de plusieurs éléments (azote, phosphore et potassium) est plus efficace pour les plantes que l'action de chaque élément utilisé seul. Ces éléments se trouvent à l'état naturel sous formes de phosphate, nitrates et différents sels de potassium. Ils ne sont généralement pas directement utilisables comme engrais, c'est la raison pour laquelle l'industrie prépare toute une gamme d'engrais chimiques.

3. Terminologie des engrais

- Engrais simples : Ce sont des engrais ayant une teneur déclarée en un seul élément fertilisant majeur azote (N), potassium (K) ou phosphore (P).

- Engrais composés : Ce sont des engrais ayant des teneurs déclarées en au moins deux éléments fertilisants majeurs. Ce sont des engrais binaires (NP, PK, NK) ou des engrais ternaires (NPK).

Les teneurs en 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 des teneurs exprimés en (%) massique dont la formule s'écrit dans l'ordre %N - % P_2O_5 - % K_2O . Les formules d'engrais fabriqués à partir du phosphate naturel sont :

- ✓ 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% azote, 55% phosphore et 0% potassium)
 - ❖ Le phosphate di ammoniaque : DAP (18% azote, 46% phosphore et 0% potassium)
 - ❖ Le sulfophosphate d'ammonium : ASP (19% azote, 38% phosphore et 0% potassium)
- ✓ Engrais composés (ternaire):

A partir des engrais composés binaires cités ci-dessus on peut fabriquer des engrais ternaires par l'addition de composés tels que, le chlorure de potassium KCl ou le sulfate de potassium K_2SO_4 [2].

III. Procédé de fabrication des engrais

1. Principe de fabrication

La fabrication des engrais azotés consiste à neutraliser l'acide phosphorique (réaction exothermique). Toute fois l'instabilité du phosphate tri ammoniaque $(NH_4)_3PO_4$ dans les conditions de fabrication limite la neutralisation par contrôle analytique du rapport molaire.

$$RM = \frac{\text{Nombre de moles de } NH_3}{\text{Nombre de moles de } H_3PO_4}$$

avec RM: rapport molaire

Le procédé consiste à effectuer la neutralisation en deux étapes :

- Une pré neutralisation de l'acide phosphorique H_3PO_4 par l'ammoniac 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 moindres en ammoniac par tension de vapeur. Cette première étape s'effectue dans un réacteur prèneutraliseur (PN) agité, de volume $80m^3$.

- Une ammoniation complémentaire jusqu'à obtention d'un $RM = 1,8$ pour DAP et $RM = 1$ pour le MAP, favorisent la cristallisation. Ce deuxième stade est réalisé dans un tambour de granulation (granulateur).
- La chaleur dégagée aux deux stades de la réaction provoque l'évaporation d'une grande quantité d'eau introduite pour diluer l'acide phosphorique. Ainsi toute la masse gazeuse (dégagée du préneutraliseur et du granulateur) est récupérée pour faire un lavage au niveau de la section de lavage afin d'améliorer le rendement en récupérant l'ammoniac non réagit au cours des deux étapes de neutralisation.

2. Procède de fabrication (JACOBS)

La fabrication du DAP et du MAP selon le procédé « JACOBS » se fait en six étapes principales (figure1)[3].

- ❖ La neutralisation (Réactions d'ammoniation).
- ❖ La granulation.
- ❖ Le séchage.
- ❖ La classification granulométrique.
- ❖ Le conditionnement du produit (refroidissement + enrobage).
- ❖ Assainissement et lavage des gaz.

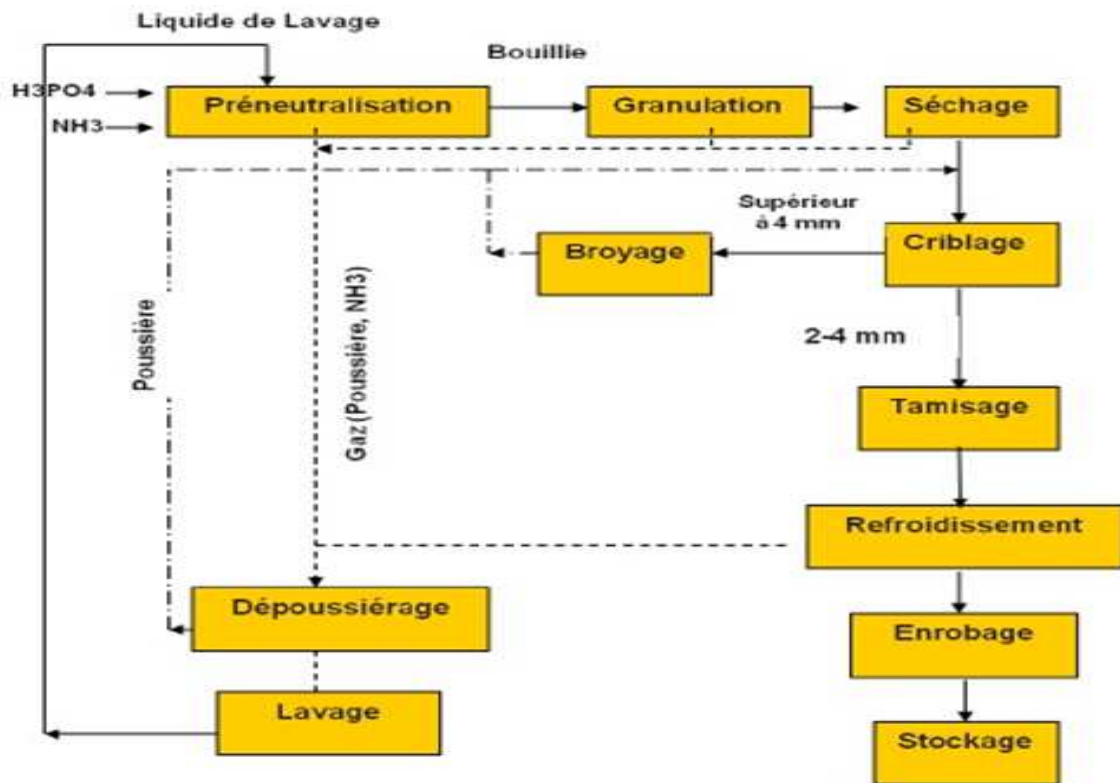
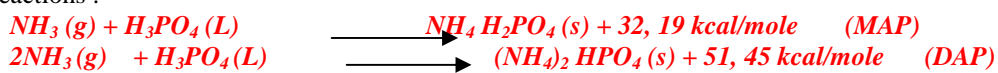


figure1:les étapes de fabrication d'engrais

a) Neutralisation

Les phosphates d'ammonium sont à l'échelle mondiale, les engrais phosphatés les plus utilisés grâce à leurs teneurs élevées en éléments essentiels et à leurs propriétés physiques. Le principe de fabrication consiste à produire du phosphate d'ammonium par neutralisation de l'acide phosphorique par l'ammoniac suivant les réactions :



Le rapport molaire, pour cette première ammoniation, doit être à peu près 1,4 pour le DAP et 0.6 pour le MAP.

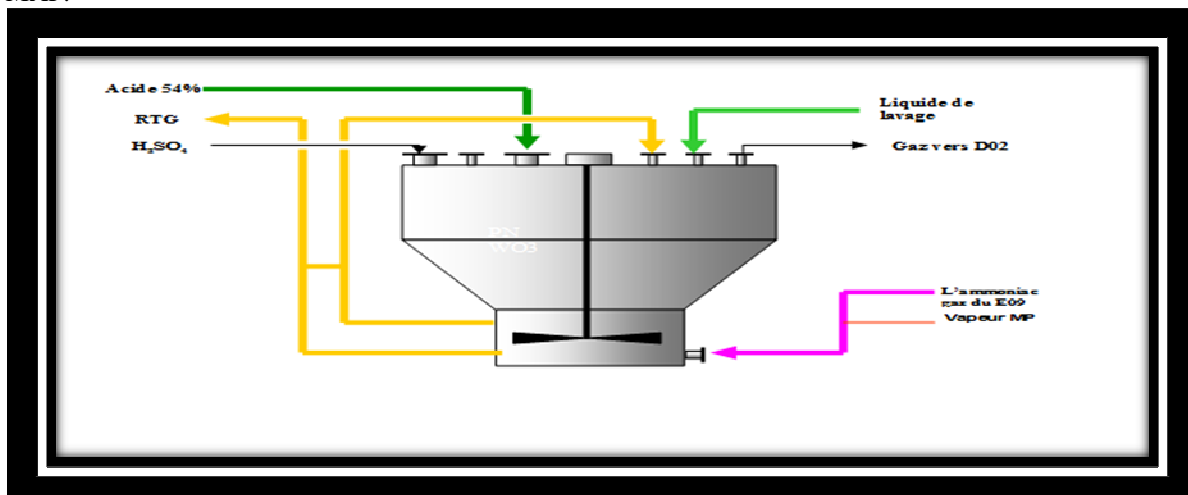


Figure 2: schéma descriptif d'un préneutraliseur

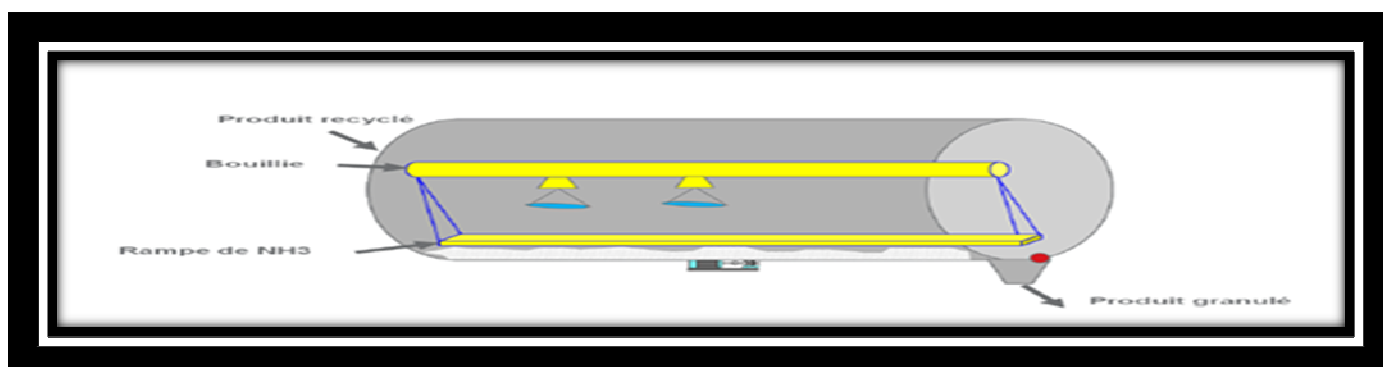
b) Granulation

L'opération de granulation consiste à transformer la bouillie venant du préneutraliseur (figure2) en un produit granulé de dimensions bien déterminées. A l'aide d'un réacteur tubulaire de granulateur (figure3), la bouillie est pulvérisée à travers des buses de pulvérisation sur un lit de matière sèche recyclée. Le mouvement de rotation du granulateur permet une distribution uniforme et produit une couche de granulé durs. C'est à ce stade qu'a lieu la seconde neutralisation de l'acide phosphorique contenu dans la bouillie. À fin de ramener son rapport molaire de 1,4 à 1,8 pour le DAP et de 0,6 à 1 pour le MAP favorisent la cristallisation de la bouillie. Le produit granulé humide sort du granulateur à travers une grille située à la sortie de la virole et s'achemine directement vers le sécheur (figure4) par l'intermédiaire d'une goulotte

Figure 3 : schéma descriptif du granulateur

c) Séchage

L'opération de séchage consiste à débarrasser le produit d'une partie de son eau, grâce à une masse d'air chaude que l'on fait passer au dessus du produit granulé. Cette étape permet 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. A la sortie du tube sécheur, les gaz chargés d'eau et de poussières sont traités au niveau



d'une batterie de cyclones. Pour récupérer le maximum de poussières en les recyclant vers le granulateur. Les gaz chauds assurant le séchage de l'engrais proviennent du four sécheur (figure4) constitué principalement d'une chambre à combustion à fuel.

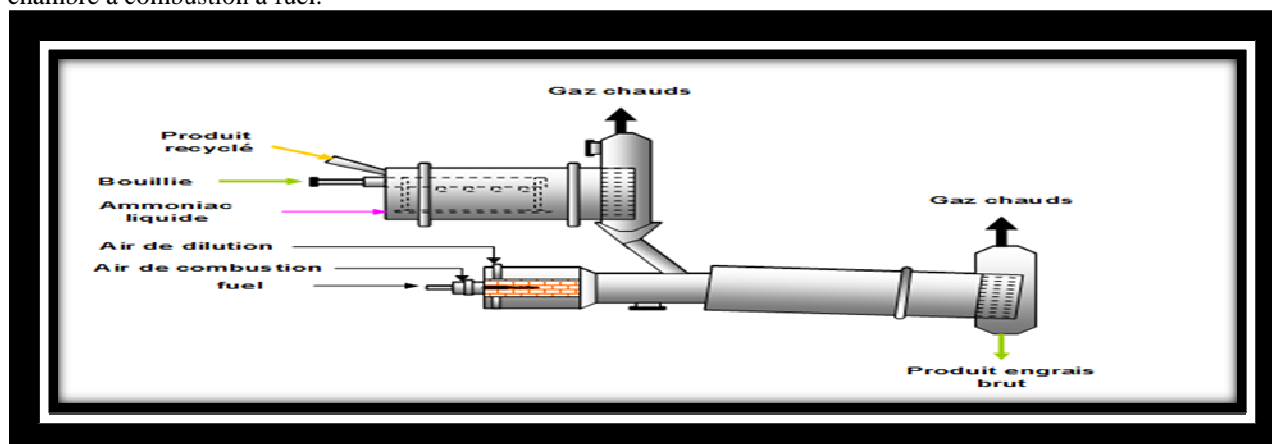


Figure 4 : schéma descriptif du sécheur

d) Classification granulométrique

La séparation granulométrique de l'engrais permet de fabriquer un produit marchand à la granulométrie requise entre 2 et 4 mm et d'extraire le produit de recyclage qui alimente le granulateur. Après l'alimentation du convoyeur T05, ce dernier alimente à son tour et à travers des boîtes de volets de répartition (H03, H02, H01) les distributeurs vibrants T01, T02, T03 et T04 qui répartissent le produit sur toute la largeur des cribles (figure 5) à doubles étages S01, S02, S03 et S04. Les grains fins de criblage sont acheminés directement vers la bande de recyclage T02, les gros grains refusés par la toile supérieure des cribles sont acheminés vers des broyeurs (figure 5) B01, B02, B03 et B04 pour rejoindre aussi la bande de recyclage T02.

Le produit marchand est acheminé vers la bande T08 qui alimente à la fois l'élévateur T09 et la bande T02 à l'aide du volet H01. Après le passage par T09 le produit marchand se trouve aux tamis finisseurs (figure 5) à double étage S06 et S11 pour améliorer la qualité de la granulométrie.

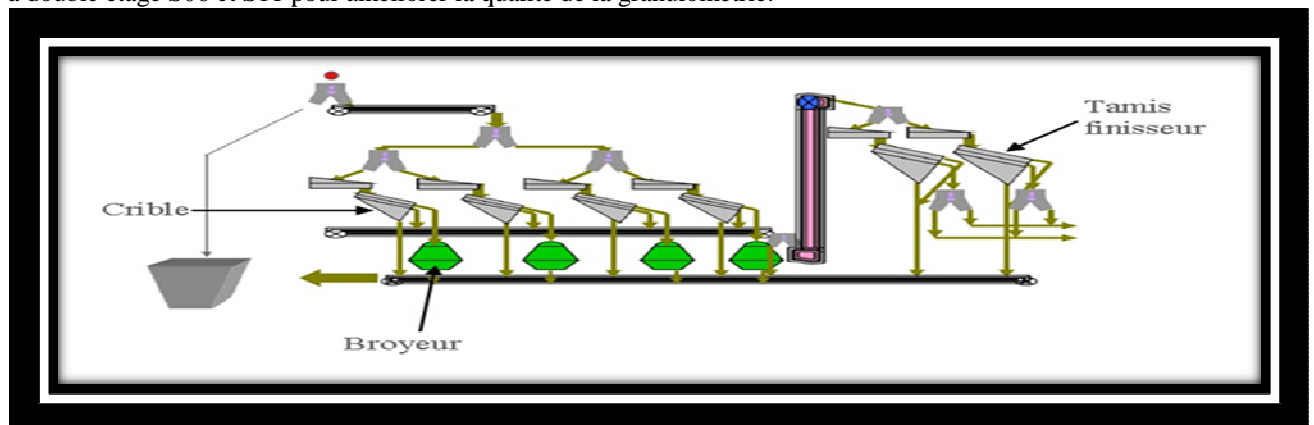


Figure 5 : schéma descriptif des cribles et broyeurs

e) Conditionnement du produit

i. Refroidissement

Le produit venant des tamis finisseurs alimente, par gravité, un refroidisseur à lit fluidisé (figure 6) E02 dont le rôle est d'abaisser la température du produit fini à une valeur comprise entre 40 et 46 °C par mise en contact avec l'air ambiant aspiré par deux ventilateurs C03 et C04 à travers deux échangeurs E01 et E08.

Ces échangeurs comportent deux batteries : Une froide où l'air est refroidi à 21°C en rentrant en échange thermique avec NH₃ et l'autre chaude où l'air est réchauffé à une température de 27°C via un échange avec la vapeur circulant dans des serpentins à l'intérieur des échangeurs. Son humidité étant éliminée l'air est refoulé au refroidisseur (figure 6)

ii. Enrobage

Le produit sortant du refroidisseur alimente un élévateur à godets T11 lequel alimente l'enrobeur (figure 6). Le produit marchand est enrobé par pulvérisation du fuel ou de l'huile aminée afin d'éviter la prise en masse, la formation de poussières et l'absorption de l'humidité lors du stockage. Le produit sortant de l'enrobeur est évacué vers une bande de produit fini T14 qui alimente trois installations du stockage à l'aide d'une série de convoyeurs à bande.

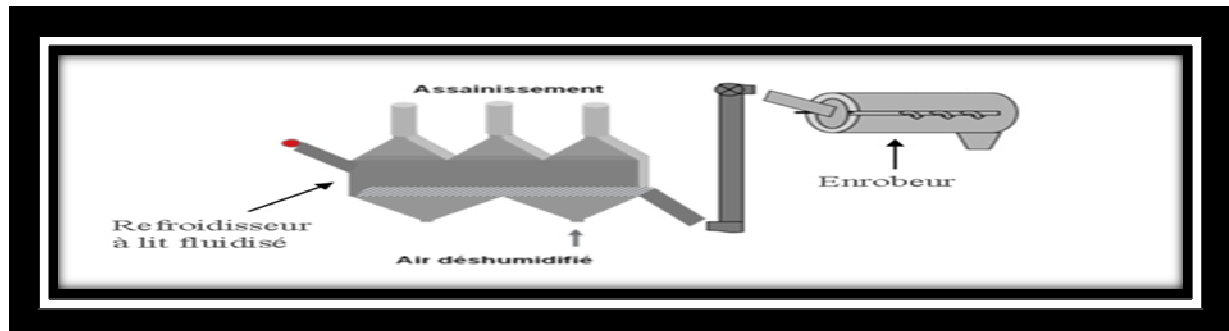


Figure 6: schéma descriptif du refroidisseur et d'enrobeur

f) L'assainissement : la collecte et le lavage des gaz

L'air contenant des poussières résultantes de la manutention des cribles, des broyeurs, des bandes et des élévateurs est aspiré par les deux ventilateurs C07 et C08 pour l'acheminer respectivement vers les cyclones S10 et S09 où la majeure partie de ces poussières est récupérées.

Après le cyclonage, l'air circule vers le venturi D06 et le laveur D08 où les traces de poussière sont éliminées par l'eau brute. L'air issu du premier compartiment du refroidisseur est aspiré vers le cyclone S08 via le ventilateur C05. Une grande partie de poussières est récupérée et recyclée vers la bande T02. L'air sortant des cyclones circule vers la tour D10 où il subit un lavage final par l'eau brute. L'air des deux autres compartiments du refroidisseur est soutiré par le ventilateur C06 qui le refoule vers D04 et le laveur des cyclones D05 où les poussières sont récupérées par l'eau circulant dans les laveurs.

Conclusion

Les éléments fertilisant majeurs sont l'azote, le phosphore et le potassium. Ils se trouvent à l'état naturel mais ne sont pas directement utilisable comme engrais, c'est la raison pour laquelle l'industrie prépare une gamme des engrais chimique dont la consommation est en pleine croissance. Les engrais se trouvent sous plusieurs formes mais les engrais granulés sont de plus en plus utilisés à l'échelle internationale notamment les engrais composés MAP/DAP. Le procédé de fabrication des engrais selon le procédé JACOBS se fait en plusieurs étapes : La pré neutralisation, la granulation, le séchage, la classification granulométrique, le refroidissement et l'enrobage.

Chapitre II :

Les technologies du séchage

- Méthodes de transfert de chaleur

- Procédés de séchage
- Appareillage

Introduction

L'opération de séchage est une étape importante dans la chaîne de la fabrication des engrais, elle permet de réduire l'humidité du produit fini à la valeur imposée par les spécifications commercialisées.

Le séchage permet également de faciliter la manutention du produit, de réduire les coûts liés au transport et d'éviter la prise en masse du produit.

L'atelier des fertilisants de Jorf Lasfar, cette opération s'effectue dans un sécheur à Co-courant par contact direct entre gaz chaud et le produit humide sortant du granulateur, le chauffage de l'air s'effectue par la combustion du fuel.

I. Méthodes de transfert de chaleur

1. séchage par convection

C'est le mode de séchage le plus fréquent dans l'industrie chimique : on envoie sur la matière à sécher un courant gazeux chaud (le plus sec possible) qui fournit la chaleur nécessaire à l'évaporation du liquide et entraîne la vapeur formée.

La température du gaz diminue entre l'entrée et la sortie alors que c'est le contraire pour le solide.

2. séchage par conduction

Le produit à sécher se trouve en contact avec une paroi solide portée à une température élevée par chauffage (fumées, vapeur d'eau ...)

La conduction à travers la paroi et la matière entraîne une augmentation de la température du composé à sécher : le liquide se vaporise donc par évaporation ou par ébullition si il atteint sa température d'ébullition.

3. Séchage par rayonnement

Ce mode de séchage convient aux produits en plaques ou en films, donc de faible épaisseur.

L'apport d'énergie s'effectue par ondes électromagnétiques générés soit par des dispositifs électroniques (micro-ondes) soit par élévation de la température d'un émetteur infrarouge.

II. procédés de séchage

Les procédés de séchage se distinguent par la manière dont est réalisé le contact entre la matière et l'air de séchage :

1. Procédé à courant croisé :

L'air de séchage se déplace perpendiculairement à la direction du mouvement du produit, ce mouvement est assuré, soit par système mécanique (godet, wagon, bande perforée, sole perforée vibrante), soit par fluidisation du produit au moyen de l'air de séchage, ce procédé est utilisé dans le cas où les produits ont une faible résistance mécanique.

2. Procédé à contre courant :

Le produit humide entrant vient en contact d'un gaz refroidi et chargé d'humidité, le gaz chaud vient au contact de produit séché. Il peut arriver que le point de rosée soit atteint sur la surface du produit, ce procédé s'applique dans le cas où le produit humide ne supporterait pas la chaleur.

3. Procédé à Co courant :

Les gaz chauds rencontrent le produit humide a son entrée dans le sécheur .la différence de température permet une évaporation rapide a l'entrée du sécheur. La température des gaz diminue, ce type de séchage est recommandé pour les produits :

- Résistant au contact des gaz
- Sensible à la température

III. Appareillage :

La classification des appareils peut s'effectuer suivant le procédé (continu, discontinu), le mode de séchage (convection, conduction, rayonnement,), ou le type de produits traités (solides en blocs, poudre, pate, pulpe, film...) [4]

On signalera que l'utilisation d'un procédé continu se fera préférentiellement dans le cas d'une fabrication importante. les sécheurs discontinus présentent l'inconvénient majeur d'entraîner un cout énergétique supplémentaire à chaque fin de cycle.

1. Séchage par conduction :

Les étuves constituent un exemple de sécheurs en discontinue : elles conviennent pour de faibles quantités ou pour des produits couteux exigeant des conditions de séchage très particulières. On peut donner deux exemples de sécheurs continus :

a) Les sécheurs a tambour rotatif :

Ils sont constitués par un long cylindre légèrement incliné tournant à l'intérieur d'une enceinte chauffée par des gaz de combustion d'un bruleur. le solide descend sous l'action de la gravité et de l'entraînement. le mouvement de rotation permet le renouvellement du solide au niveau des surfaces chauffantes. ils sont très appropriés pour des produits minéraux supportant des températures élevées.

b)Les sécheurs à cylindre :

Ils sont constitués de cylindres creux animés d'un lent mouvement de rotation et chauffés à l'intérieur par un fluide caloporteur. la matière à sécher s'écoule entre les cylindres. ils conviennent pour les produits sous forme de films (textiles, papier, matières plastiques)

2. Séchage par convection :

On distingue pour les sécheurs discontinus ceux fonctionnant par léchage (courant de gaz parallèles a la matière) et ceux fonctionnant par traversée (courant de gaz perpendiculaires à la matière)Deux exemples importants de sécheurs continus peuvent être indiqués :

a) Les sécheurs à tambour rotatif:

Ils présentent de grandes analogies avec les sécheurs du même type fonctionnant par conduction , mais ici l'air chaud est directement en contact avec le produit .ce séchoir est adapté aux produits pulvérulents non collants .

b) Les sècheurs à lits fluidisés :

Ce séchoir convient pour des poudres divisés qui sont placées sur un support poreux. Un courant d'air chaud est soufflé sous la couche de matière et un lit fluidisé s'établit, les échanges thermiques sont alors intenses et l'efficacité du séchage est très grande.

3. Séchage par atomisation :

Il est constitué d'une turbine tournant à grande vitesse, l'air est introduit chaud par un disperseur dans la chambre, pendant son trajet dans l'appareil, toute l'eau est évaporée par l'air. Les produits peuvent être séchés par ce procédé :

- ✓ Produits minéraux (pigments, engrais)
- ✓ Produits organiques (colorants, polymères, produits pharmaceutiques)
- ✓ Produits alimentaires

Différentes critères pour choisir l'appareil le mieux adapté au séchage d'une substance :

- ❖ Le mode de fonctionnement de l'appareil.
- ❖ La nature et la qualité du produit à sécher.
- ❖ La source de chaleur et le mode de transmission.
- ❖ La consommation d'énergie.
- ❖ Le coût de séchage

D'après l'illustration des différents modes de séchage qui correspondent au cas de séchage des solides et en les adaptant à notre cas (engrais DAP), on voit que le choix optimal du mode de séchage pour profiter de la forme divisé du produit DAP (grains de diamètre entre 2 et 4 mm) est le mode de séchage par convection à traversée simple. Ce choix est favorisé par rapport au mode de séchage par convection à fluidisation car pour ce dernier il y a toujours un risque de colmatage du produit dans les trous des grilles en cas de fusionnement du produit. Le choix adopté par l'OCP pour le séchage d'engrais DAP est un tambour rotatif de mode de séchage par convection à traversée simple qui est bien le choix le plus optimal dans ce cas.

Chapitre III :

Etude de l'unité de séchage

- Réaliser le bilan massique et thermique
- Proposer quelques actions pour l'amélioration de la section du séchage

I. Bilan de matière et thermique

Afin d'accomplir sa tâche, le sécheur a besoin d'une source de chaleur qui n'est autre que la chambre de combustion. Cette dernière est équipée d'un brûleur alimenté en fuel lourd comme combustible et de l'oxygène de l'air comme comburant.

Le contrôle de cette section se fait par l'opérateur de la salle de contrôle, en agissant sur le débit de consommation de fuel avec contrôle du circuit d'aspiration et refoulement du ventilateur repère C01 ainsi que l'état de combustion.

Afin de déterminer la différence d'humidité entre le produit entrant dans le sécheur et le même produit sortant c'est-à-dire la quantité d'eau évaporée on va établir un bilan massique, ainsi qu'un bilan thermique au niveau de la chambre de combustion dans le but de déterminer le débit et l'enthalpie de la masse gazeuse[5].

1. Bilan de matière de l'unité de production engrais

Les matières premières utilisées pour la fabrication des engrais :

- ✓ Acide phosphorique 54% et 29%
- ✓ L'ammoniac gaz et liquide.

Données :

- Capacité de production est 90 t / h
- Densité d'acide P_2O_5 54% est 1,65
- Titre d'acide P_2O_5 54% est 0,54
- Densité d'acide P_2O_5 29% est 1,3
- Titre d'acide P_2O_5 29% est 0,29
- Densité d'acide du mélange 42% est 1,48
- Titre d'acide du mélange 42% est 0,42
- Densité d'ammoniac est 0,6732
- Rendement d'azote est $R_N = 96\%$
- Rendement de P_2O_5 est $R_P = 98\%$
- DAP : 18%azote, 47%phosphore et 00%potassium

➤ Bilan d'ammoniac

On a la réaction de DAP: $2NH_3(g) + H_3PO_4(L) \rightarrow (NH_4)_2HPO_4(s) + Q$

Avec les % de DAP sont : 18%azote, 47%phosphore et 00%potassium

Pour fabriquer 1 tonne de DAP il faut donc : 0,18 tonne d'azote et 0,47 tonne de P_2O_5

D'après la réaction suivante: $N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$

$$n(N_2) = n(NH_3) / 2$$

$$m(N_2) / M(N_2) \cdot 1 / R_N = m(NH_3) / 2 \cdot M(NH_3) \quad R_N: \text{Rendement d'azote} = 96\%$$

$$m(NH_3) = 2 \cdot \frac{m(N_2)}{M(N_2)} \cdot M(NH_3) \cdot \frac{1}{R_N}$$

$$\boxed{m(NH_3) = 0,227 \text{ t}}$$

Il faut donc 0.227 tonne de NH₃ pour produire 1 tonne de DAP

On sait que: $d = \rho(\text{NH}_3) / \rho(\text{eau})$ avec: $\rho(\text{eau}) = 1 \text{ kg/m}^3$ et $\rho(\text{NH}_3) = m / Qv(\text{NH}_3)$

Avec $Qv(\text{NH}_3)$ la quantité volumique de NH₃

Alors: $d = m / Qv(\text{NH}_3) \Rightarrow Qv(\text{NH}_3) = m / d(\text{NH}_3)$

Ce qui donne : $Qv(\text{NH}_3) = 0,337 \text{ m}^3$

➤ **Bilan de P₂O₅**

On a $R_p = (\%(\text{P}_2\text{O}_5) \cdot 1) / (m(c) \cdot \% (42\%))$

Avec R_p : **Rendement de P₂O₅ = 98%** et $m(c)$: masse du mélange

$m(c) = \%(\text{P}_2\text{O}_5) \cdot 1 / R_p \cdot \% (42\%)$

$m(c) = 1,14 \text{ t}$

Il faut donc une masse de 1,14 tonne du mélange d'acide (54% et 29%)

On détermine la quantité volumique du mélange Q_{vc} à partir de la relation suivante:

$Q_{vc} = m(c) / d(\text{mélange})$

ce qui donne : $Q_{vc} = 0,770 \text{ m}^3$

➤ **Bilan des acides**

Pour trouver la masse et le volume d'acide (54%) et (29%) on va résoudre ce système:

$$\begin{cases} m_{(A)} + m_{(B)} = m_{(C)} \\ 0,54 m_{(A)} + 0,29 m_{(B)} = 0,42 m_{(C)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} m_{(B)} = m_{(C)} - m_{(A)} \\ 0,54 m_{(A)} + 0,29 (m_{(C)} - m_{(A)}) = 0,42 m_{(C)} \end{cases}$$

Avec $m_{(A)}$: masse d'acide P₂O₅ 54% et $m_{(B)}$: masse d'acide P₂O₅ 29%

$$\begin{cases} m_{(B)} = m_{(C)} - m_{(A)} \\ m_{(A)} = m_{(C)} \cdot \frac{0,42 - 0,29}{0,54 - 0,29} \end{cases}$$

Donc : $m_{(A)} = 0,5928 \text{ t}$

La quantité volumique d'acide 54% (A) est déterminé par relation suivante:

$Q_{vA} = m_{(A)} / d_{(A)}$

Ce qui donne : $Q_{vA} = 0,3592 \text{ m}^3$

Et par conséquent la quantité volumique d'acide 29% (B)

$Q_{vB} = Q_{vc} - Q_{vA}$

$Q_{vB} = 0,4108 \text{ m}^3$

alors pour produire 90 t/h de DAP on a besoin de :

$Q_A = 90 \cdot 0,3592 = 32,328 \text{ m}^3/\text{h}$

$Q_B = 90 \cdot 0,4108 = 36,972 \text{ m}^3/\text{h}$

$Q_{\text{NH}_3} = 90 \cdot 0,337 = 30,33 \text{ m}^3/\text{h}$

2. Bilan dans la chambre de combustion

Dans la chambre à combustion différentes produits mise en jeu sont (figure7) le fuel , l'air à combustion, l'air de dilution (primaire, secondaire) et gaz avec:

- ❖ F: Débit du fuel lourd n°2
- ❖ Q_{ac}: Débit d'air de combustion
- ❖ Q_{adp}: Débit d'air de dilution primaire
- ❖ Q_{ads}: Débit d'air de dilution secondaire
- ❖ G: Débit d'air à la sortie chambre de combustion

a. Fuel lourd n°2

Le fuel utilisé est le fuel lourd n°2 dont la composition chimique est la suivante :

ELEMENT	C	H	S	H ₂ O
%	85.8	10.2	3	1

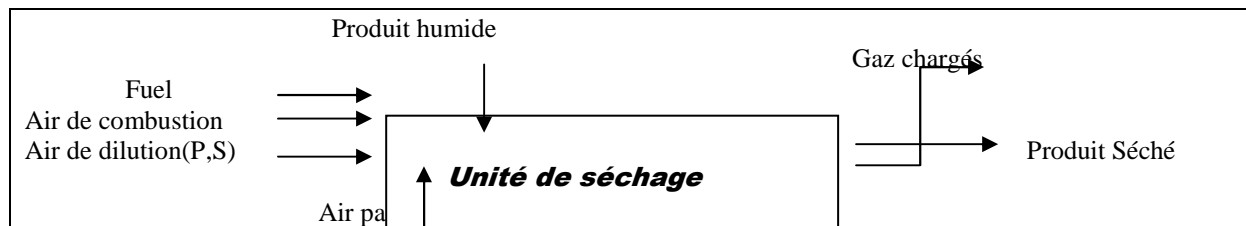


Figure 1 : Schéma d'une unité de séchage

Ses caractéristiques chimiques sont :

- Densité : 0,94 à 30°C. et 0,88 à 100°C
- Chaleur spécifique Cp : 0.523 Kcal/Kg °C
- température de fonctionnement 120°C
- Point d'écoulement : 36 °C

Sa chaleur sensible à 25°C est calculée par :

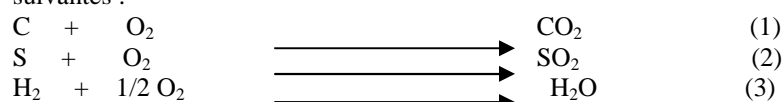
On détermine l'enthalpie de fuel d'après la relation : $H_f = F.C_p.dT$

avec: $dT=(T_2.T_1)$ et F: =le débit de fuel

ce qui donne: $H_f = 49,658.F \text{ Kcal/h}$

b. Air de combustion

L'air de combustion n'est que l'air ambiant aspiré par les ventilateurs C09 ou bien C14. Son débit est déterminé en tenant compte des réactions de combustion de différents composés du fuel selon les réactions suivantes :



La combustion totale d'un Kg de fuel nécessite une quantité d'oxygène déterminée à partir des réactions précédentes.

D'après les équation on a: $\Rightarrow n(\text{O}_2) = n(\text{O}_2)_1 + n(\text{O}_2)_2 + n(\text{O}_2)_3$

Avec: $n(\text{O}_2)_1$: quantité d'oxygène qui réagit avec le carbone (reactoin1)

$n(\text{O}_2)_2$: quantité d'oxygène qui réagit avec le soufre (reactoin2)

$n(\text{O}_2)_3$: quantité d'oxygène qui réagit avec l'hydrogène (reactoin3)

$$\Rightarrow n(\text{O}_2) = n(\text{C}) + n(\text{S}) + n(\text{H}_2)/2$$

on détermine la masse de O₂ aide la combustion fuel :

$$\Rightarrow m(\text{O}_2) = M(\text{O}_2) \cdot \left[\frac{m(\text{C})}{M(\text{C})} + \frac{m(\text{S})}{M(\text{S})} + \frac{m(\text{H}_2)}{2 \cdot M(\text{H}_2)} \right]$$

$$m(\text{O}_2) = 32.(85,8/12 + 3/32 + 10,2/4)$$

Les valeurs de la composition chimique du fuel permette de déduire la masse de O₂ totale: 85.8 % de carbone, 3% du soufre et 10.2 de hydrogène

Donc: $m(\text{O}_2) = 311,8 \text{ kg pour } 100\text{kg de fuel}$

Donc la combustion totale d'un Kg de fuel nécessite une quantité stœchiométrique d'oxygène de 3,118 kg d'O₂/Kg de fuel.

Sachant que l'air atmosphérique est composé de 21% de O₂ et 79 % de N, la masse d'air correspondante est alors de :

$$m(\text{air}) = (m(\text{O}_2)/0,21)$$

$$\boxed{m(\text{air}) = 14,84 \text{ Kg d'air sec / Kg de fuel}}$$

Pour avoir une combustion complète et pour des raisons de sécurité en ajoute un excès de 30%.

$$m(\text{air}) = 14,84 + (14,84 \cdot 30/100)$$

$$\boxed{m(\text{air}) = 19,292 \text{ Kg d'air sec/Kg de fuel}}$$

En tenant compte de l'humidité de l'air de combustion qu'est de 0.0125Kg d'eau par Kg d'air sec.

$$m(\text{air}) = 19,292 + (0,0125 \cdot 19,292)$$

$$\boxed{m(\text{air}) = 19,533 \text{ Kg d'air sec/ kg de fuel}}$$

On multiplie la masse (aire) par le débit de fuel F pour déterminer le débit d'air de combustion

$$Q_{ac}: \text{débit de l'air a combustion} \quad \boxed{Q_{ac} = 19,533 \cdot F \text{ kg d'air/h}}$$

Données concernant l'air de combustion :

Température 35°C

C_p $0,24 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$

L'enthalpie d'air de combustion est calculée par: $H_{ac} = Q_{ac} \cdot C_p \cdot dT$

$$\text{donc} \quad \boxed{H_{ac} = 46,8792 \cdot F \text{ Kcal/h}}$$

c. Air de dilution primaire

L'air de dilution primaire est introduit à l'entrée de la chambre de combustion. Il permet de refroidir les briques constituant les parois de la chambre de combustion, et maintient une température au foyer de la chambre de combustion inférieure à 950°C cet air est aspiré par le ventilateur C01, dont les caractéristiques sont :

Le débit d'air de dilution primaire est : $Q_{adp} = 41680 \text{ Kg/h}$

Température : 35°C

Humidité : $0,0125 \text{ Kg H}_2\text{O/ Kg d'air sec}$

C_p : $0,24 \text{ Kcal/ Kg}^\circ\text{C}$

L'enthalpie d'air de dilution primaire est calculée par :

$$H_{adp} = [(Q_{adp} \cdot C_p) + (Q_{adp} \cdot \text{Humidité})] \cdot dT$$

$$\text{ce qui donne:} \quad \boxed{H_{adp} = 105242 \text{ Kcal/h}}$$

d. Air de dilution secondaire

L'air de dilution secondaire est utilisé pour obtenir à la sortie de la chambre de combustion une température inférieure à la température de fusion des grains qui est de l'ordre de 155°C pour le DAP a fin d'éviter la fusion du produit et par conséquent le bouchage du sécheur.

Cet air provenant de l'air de refroidissement du premier caisson du refroidisseur, est composé uniquement de l'air chaud, aspiré par le ventilateur C01.

Débit d'air de dilution secondaire : $Q_{ads} = 24160 \text{ Kg/h}$

Température : 64°C

Humidité : $0,0183 \text{ Kg d'eau/Kg d'air sec}$

C_p : $0,24 \text{ Kcal/Kg}^\circ\text{C}$

L'enthalpie de dilution secondaire est calculée par :

$$H_{ads} = [(Q_{ads} \cdot C_p) + (Q_{ads} \cdot \text{Humidité})] \cdot dT$$

$$\text{alors:} \quad \boxed{H_{ads} = 243380 \text{ Kcal/h}}$$

❖ Bilan de matière:

D'après la figure7 le bilan de matière doit être d'écrit de la manière suivante:

$$G = F + Q_{ac} + Q_{adp} + Q_{ad}$$

$$G = F + 19,533 \cdot F + 41680 + 24160$$

$$G = 20,533 \cdot F + 65840$$

❖ **Bilan de thermique:**

on détermine la chaleur sensible des gaz par la relation suivante:

Avec: $H_g = ((PCI.F) + H_p) + H_{ac} + H_{adp} + H_{ads} \quad (1)$

pour calcul le pouvoir calorifique inférieur (PCI) :

Soit un combustible, le fuel lourd N°2 dont la composition est : **C 85,8% ; H₂ 10,2% ; S 3%**

Pour 1 kg de fuel on a : 870 g de C ; 110 g de H₂; 20g de S

C+O₂ ~~C~~O₂ + 94 Kcal/mole

H₂ + ½ O₂ ~~H₂~~O (vapeur) + 58 Kcal/mole

S+ O₂ ~~S~~O₂ + 71 Kcal /mole

Calcul des nombres de moles : m/M

C : 85,8/12 = 71,5 moles H₂ : 102/2 = 51 moles

S: 20/32 = 0,9375 moles

L'énergie (E) des réactions pour 1 kg de fuel:

Pour le carbone : E_c = 71,5 x 94 = 6721 Kcal

Pour l'hydrogène : E H₂O Vap : 58 x 55 = 2805 kcal

Pour le soufre : $Es = 71 \times 0.9375 = 66,5625 \text{ Kcal}$.

Le calcul du pouvoir calorifique inférieur est donné à partir de la somme des énergie

$$\text{PCI} = 6815 + 3190 + 44,375 = 9592,56 \text{ Kcal /Kg fuel}$$

Ceci permet de calculer l'enthalpie du gaz à partir du (1)

Donc : $Hg = (9592,56 + 49,685).F + 46,8792.F + 105242 + 243380$

$$\text{Hg} = 9689,12.F + 348622$$

En tenant compte des pertes de chaleur au niveau de la chambre de combustion qui sont estimées à 2%, l'enthalpie des gaz sera donc :

$$[(9689,12) - (9689,12 \cdot (2/100)).F] + [348622 - (348622 \cdot (2/100))]$$

$$\text{Hg} = 9495,33.F + 341649,56$$

3. Bilans dans le sécheur

L'évaluation du bilan matière et thermique du sécheur a pour but de calculer la quantité d'eau évaporée, la quantité de chaleur disponible ainsi que la quantité d'air qui traverse le sécheur. Les pertes à travers les parois du sécheur sont estimées à 3%.

a) Chaleur à l'entrée du sécheur

La chaleur à l'entrée du sécheur est la somme des chaleurs des gaz sortant de la chambre de combustion, la chaleur du produit humide sortant du granulateur et la chaleur apportée par l'air parasite.

- Gaz sortie de combustion : $G = 20,533.F + 65840$
- L'enthalpie de gaz sortie de combustion : $Hg = 9495,33.F + 341649,56$
- Produit entré sécheur DAP :

Débit du produit à l'entré du sécheur : $Q_{me} = 222\ 500 \text{ Kg/h}$

$C_p = 0,36 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

$T = 85^\circ\text{C}$

L'enthalpie du produit à l'entré du sécheur : $H_{me} = Q_{me} \cdot C_p \cdot dT$

Ce qui donne : $H_{me} = 4\ 806\ 000 \text{ Kcal/h}$

❖ L'air parasite :

Débit d'air parasite : Q_p

Température : 35°C

C_p : $1,193 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

Enthalpie d'air parasite : $H_{Qp} = 11,93 \cdot Q_p$

La chaleur à l'entrée du sécheur est la somme des enthalpies :

$$\text{He} = \text{Hg} + \text{Hme} + \text{HQp}$$

b) Chaleur totale à la sortie du sécheur

Chaleurs du produit sortant :

Débit du produit sortant Q_{ms} : $246\ 000 \text{ Kg/h}$

T : 88°C

C_p : $0,33 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

L'enthalpie du produit sortant $H_{ms} = Q_{ms} \cdot C_p \cdot dT$

$$\text{Hms} = 5\ 114\ 340 \text{ Kcal/h}$$

Gaz extrait du sécheur par le ventilateur C01 :

Débit des gaz : $Q_{gs} = 127\ 500 \text{ Kg/h}$

C_p : $0,36 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$

T : 85°C

L'enthalpie des gaz : $H_{gs} = Q_{gs} \cdot C_p \cdot dT$

Donc $\text{Hgs} = 3\ 820\ 887 \text{ Kcal/h}$

Donc l'enthalpie totale à la sortie du sécheur en tenant compte des pertes qui sont estimées à 97% est la somme des chaleurs du produit séché et de la chaleur des gaz extraits

$$H_s = 0,97.(5114\ 340 + 3\ 820\ 887) \text{ Kcal/h}$$

4. Détermination de la quantité de fuel consommé

L'équation du bilan matière sur le sécheur s'écrit :

$$G + Q_{me} + Q_p = Q_{ms} + Q_{gs}$$

$$20,533.F + 65840 + 222\ 500 + Q_p = 127\ 500 + 246\ 000$$

$$20,533.F + Q_p = 85160 \text{ Kg/h}$$

L'équation du bilan de chaleur sur le sécheur s'écrit:

$$H_g + H_{me} + H_{Qp} = H_s$$

$$9495,33.F + 341649,56 + 11,93.Q_p + 4806000 = 0,97.(5114340 + 3820887)$$

$$9495,33.F + 11,93.Q_p = 3519520,63 \text{ Kcal/h}$$

Donc on a un système de deux équations et deux inconnus: F et Q_p

$$\begin{cases} 20,533.F + Q_p = 85160 \\ 9495,33.F + 11,93.Q_p = 3519520,63 \\ Q_p = 85160 - 20,533.F \\ 9495,33.F + (11,93.85160) - (11,93.20,533).F = 3519520,63 \\ Q_p = 85160 - 20,533.F \\ 9495,33.F - 244,958.F = 2503561,83 \\ Q_p = 85160 - 20,533.F \\ F = 2503561,83 / (9495,33 - 244,958) \end{cases}$$

Ce qui donne $F = 270,64 \text{ Kg/h}$ et $Q_p = 79602,94 \text{ Kg/h}$

D'après ces calculs on constate que le débit d'air parasite est très important ce qui engendre une dilution supplémentaire de l'air sortie chambre de combustion, et qui rend la température à l'entrée de la chambre de combustion non homogène, en provoquant une diminution du rendement du sécheur. C'est pourquoi il faut penser à diminuer ce débit en modifiant l'entrée du sécheur

II. Quelques actions pour améliorer les opérations de combustion et de séchage

1. Modification de l'entrée du sécheur

Actuellement les entrées des sécheurs sont ouvertes, et comme nous avons vu dans le chapitre du bilan matière et thermique que l'air parasite provoque des gradients de température à l'entrée du sécheur. La modification du seuil d'entrée consiste à:

- Confectionner un nouveau seuil d'entrée du sécheur.
- Adapter la goulotte sortie granulater et la hotte de la chambre de combustion

2. Augmentation du débit de l'air de dilution

A la lumière des résultats obtenus précédemment, des solutions ont été proposées:

- Recyclage des gaz chauds de l'assainissement vers la chambre de combustion avec augmentation de la rotation du ventilateur C01.
- une dilution complémentaire des chambres de combustions.

3. Recyclage des gaz d'assainissement général

Les gaz d'assainissement général sont des gaz chauds de température de 60 °C et chargés de poussières, donc leur recyclage vers de la chambre de combustion présentent des inconvénient puisque les poussières encrassent cette dernière.

Conclusion général

L'opération de séchage est une étape cruciale dans la chaîne de la fabrication des engrais car elle permet de réduire l'humidité du produit fini à la valeur imposé par les spécifications du client, de faciliter la manutention du produit, et d'éviter la prise en masse du produit.

De nombreux problèmes influencent l'opération de séchage à l'unité engrais, au sein du quelle nous avons effectué notre stage de fin d'étude, parmi lesquels on trouve la température et le débit de l'air de séchage. Ces paramètres ont une grande incidence sur la teneur en eau et surtout sur la tendance à la prise en masse du produit fini.

Notre projet s'est focalisé autour des axes suivants :

Dans la première partie nous avons réalisé étude bibliographique des différentes technologies actuelles adoptées pour le processus. le sécheur utilisé par l'unité engrais qui est un tambour rotatif de mode de séchage par convection à traversé ce type permet d'éviter le colmatage du produit dans les trous des grilles en cas de fusionnement du produit

Dans la deuxième partie nous avons effectué un bilan matière et thermique au niveau de la chambre à combustion et le sécheur afin de déterminer les quantités d'air parasite et de dilution nécessaire pour un bon séchage et pour déterminer les chaleurs et le débit de fuel optimal pour l'opération.

Dans la dernière partie et nous avons proposé des actions d'amélioration de l'opération de séchage, à savoir la modification de l'entrée du sécheur, l'augmentation du débit de l'air de dilution, recyclage des gaz d'assainissement général.