



# Introduction

*Toute formation ne pourra donner ses fruits, sans une application dans des cas concrets au sein de l'entreprise, et l'acquisition d'un savoir faire et d'une expérience bien appropriée.*

*S'inscrivant dans cette logique, et afin de couronner la formation théorique, la faculté des sciences et techniques, fait bénéficier ses étudiants à l'issue de la Licence Sciences et Techniques, d'un stage de fin d'études.*

*Je vous présente mon projet de fin d'études sous forme de trois parties :*

*La première partie consiste à une approche de mon milieu de stage en décrivant une présentation de LAFARGE ciment usine de Meknès et du secteur ciment au Maroc.*

*La deuxième partie c'est une « Description du procédé de fabrication du ciment » : nous ferons l'analyse des différentes étapes de production du ciment, avec la précision du processus suivi à l'usine de Meknès.*

*La troisième partie sera réservé à la partie pratique sous le titre suivant **optimisation du réglage de la tuyère.***

## **I- PRESENTATION DE LAFARGE Meknès:**

### **1- Historique :**

*Crée en 1952, sous le nom de CADEM (ciments artificiels de Meknès), elle représentait l'une des composantes clef du secteur industriel marocain. Depuis 1997, elle est devenue LAFARGE CIMENTS.*

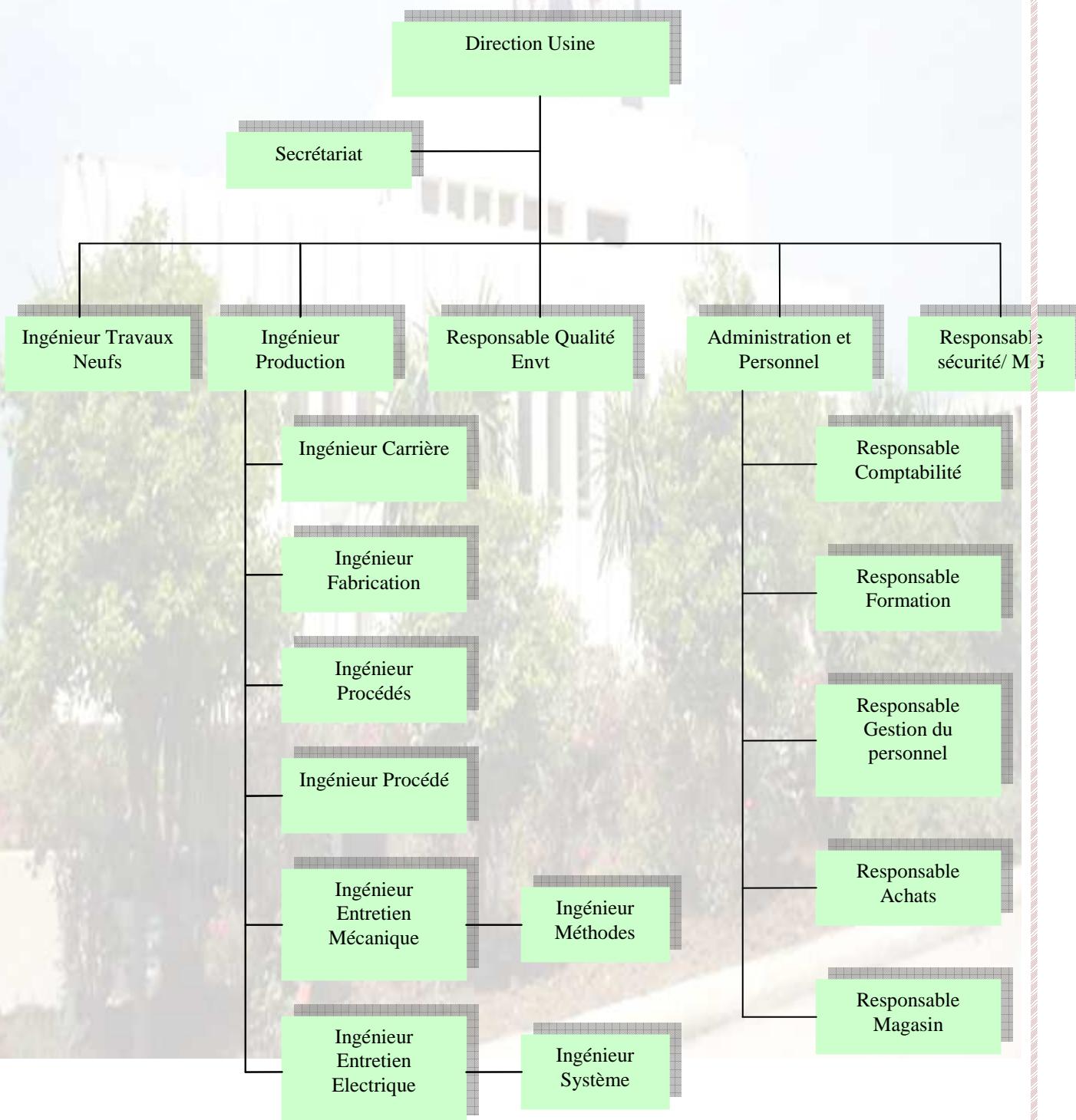
*Grâce à son potentiel de production et à son dynamisme, elle assure le leadership cimentier au MAROC.*

*Au démarrage de l'usine en 1953, la production du clinker du seul four installé était de 300 tonnes Par jour, soit moins de 100 000 tonnes par an. Depuis, plusieurs améliorations techniques ont été Réalisées pour augmenter le niveau et les performances de production*

### **2- Fiche Signalétique**

<i>Raison Sociale :</i>	<i>LAFARGE Ciments Usine de Meknès.</i>
<i>Siège Social :</i>	<i>Casablanca</i>
<i>Forme Juridique :</i>	<i>Société anonyme</i>
<i>Date de création :</i>	<i>Octobre 1995</i>
<i>Adresse :</i>	<i>Km 8 Route de Fès, BP 33 Meknès</i>
<i>Téléphone :</i>	<i>035-52-26-44/45/46</i>
<i>Fax :</i>	<i>0535-54-92-94 et 0535-54-93-05/07</i>
<i>CNSS :</i>	<i>1098343</i>
<i>N° Patente :</i>	<i>17045015</i>
<i>Registre de Commerce :</i>	<i>40779</i>
<i>Effectif du personnel :</i>	<i>340</i>
<i>Directeur :</i>	<i>Mr SAMAKA</i>
<i>Capital :</i>	<i>476 430 500 DH</i>
<i>Gamme de Produits :</i>	<i>CPJ 45 en sac et en vrac</i>
	<i>CPJ 35 en sac.</i>

### **3- Organigramme de Lafarge Meknès :**



## **I- Carrières et matières premières :**

### **1- Les matières premières :**

Les matières premières (calcaire et argiles) employées sont extraites des deux carrières d'usines :

- ❖ carrière jouxtant l'usine d'une superficie de 50 ha
- ❖ une autre carrière située à 5 km de l'usine dont les réserves sont très importantes

Ils apportent les 4 oxydes fondamentaux au fabrication de ciment qui sont la chaux  $CaO$ , la silice  $SiO_2$ , alumine  $Al_2O_3$  et ferrite  $Fe_2O_3$ , ces derniers se trouvent rarement en proportions voulues pour cela l'usine procède à des mélanges de matière d'origines différentes afin d'ajuster la composition chimique du mélange cru par incorporation d'ajouts tel que mènerai de fer (apport fer), bauxite (apport d'alumine) et schiste (apport de la silice). Ces matières premières (provenant des carrières d'usine et achetés) peuvent contenir d'autres éléments mineurs dont l'influence se manifeste sur la marche d'usine et ou la qualité de ciment tel que le  $MgO$ ,  $K_2O$ ,  $Na_2O$ , les chlorures, le soufre .....

### **2- Exploitation de carrière :**

#### **2-1- Extraction :**

L'extraction des matières premières ce fait à ciel ouvert sur des fronts de taille de 8 à 13m de hauteur et de deux manières différentes :



**Figure 1 : carrière**

- ❖ l'abattage à l'explosif par des mines profondes verticales
- ❖ par ripage des parois rocheuses avec des engins

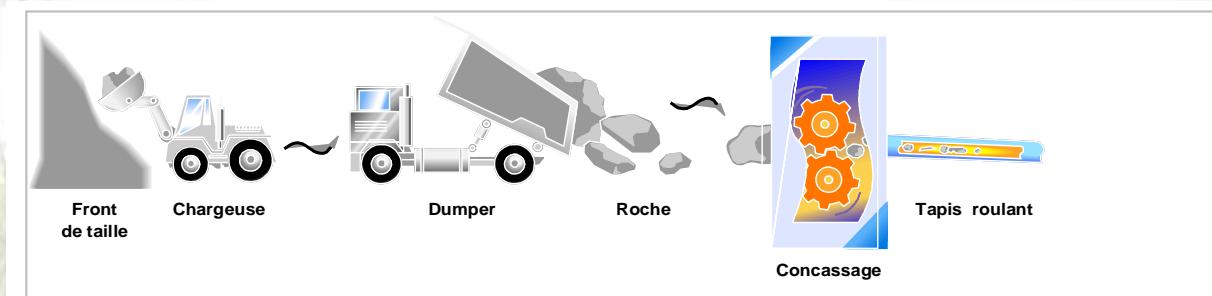
Après l'abattage le transport de calcaire et d'argile abattus vers les concasseurs est assuré par des camions (dumpers).



### 2-2- Concassage :

Le concassage a pour but de réaliser une première fragmentation afin d'obtenir une granulométrie inférieur à 8 cm pour cela l'usine dispose de deux concasseurs équipés de crible à disque :

- ❖ concasseur DUO6 de FCB avec un débit de 400 t/h
- ❖ concasseur HAZEMAG (concasseur à marteaux) avec un débit de 900t/h



**Figure 2 : concassage**

La matière concassée est ensuite acheminée vers l'usine à l'aide d'une bande transporteuse appelée CURVODIC.

### II- La préparation du cru :

#### 1- la composition du cru :

La préparation du cru est l'opération qui consiste à réaliser un mélange homogène de calcaire d'argile et de matériaux complémentaire (schiste, bauxite et minerai de fer), le mélange de ces différentes matières est déterminé de façon à respecter les modules suivants :

$\Delta bc$	$Ms$	$A/F$
$C_{\Delta bc} \pm \xi_{\Delta bc}$	$C_{Ms} \pm \xi_{Ms}$	$C_{A/F} \pm \xi_{A/F}$

**Tableau 1: composition du cru :**

- ✓  $C$  : consigne fixée en concentration par les services qualité procédé et fabrication
- ✓  $\xi$  : écart
- ✓  $\Delta bc$  : le coefficient de saturation en chaux

$$\Delta bc = ((2.8\%SiO_2 + 0.35\%Fe_2O_3 + 1.65\%Al_2O_3) - \%CaO) * 100 / (\%CaO + \%SiO_2 + \%Fe_2O_3 + \%Al_2O_3)$$

- ✓  $Ms$  : module silicique

$$Ms = \%SiO_2 / (\%Fe_2O_3 + \%Al_2O_3)$$

- ✓  $A/F$  : module alumine ferrique

$$A/F = \%Al_2O_3/\%Fe_2O_3$$

*NB : les trois modules dépend de la matière et de ligne de production c est à dire les modules pré homo différent de cru sortie broyeur et des lignes 1 de la ligne 2.*

## **2- la pré homogénéisation :**

*Le préhomo constitue un mode de stockage qui permet de construire un tas de matière pré dosé à partir des différentes matières concassées. Son objectif principal est d'avoir un stock aussi régulier que possible à la reprise et qui respecte les consignes des trois modules de la préhomo. L usine de Meknès dispose de deux préhomo polaires à chevrons de capacité 18000t\*2 pour chaque préhomo.*



***Figure 3 : pré homogénéisation***

*Le procédé de pré homogénéisation et le suivant :*

*En dépose les matières concassés par couche horizontale successive par jeteur*

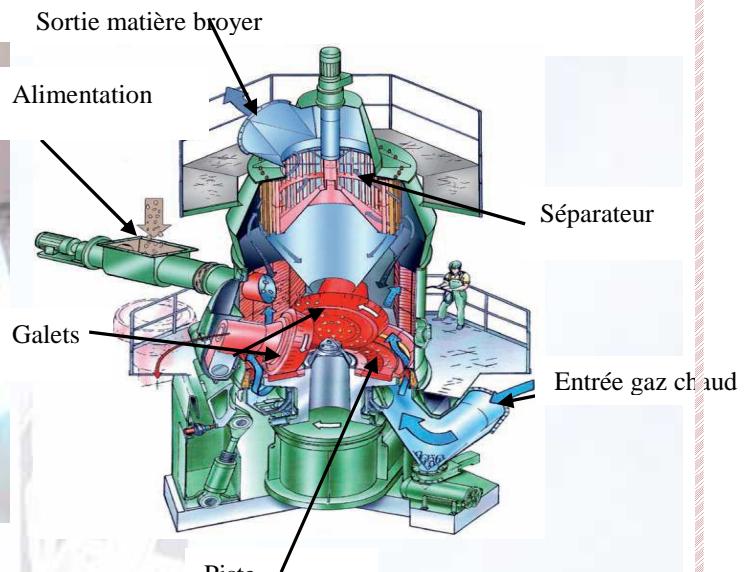
## **3- Reprise du tas :**

*Le mouvement de va et vient des herses provoque l'écoulement régulier du tas sur une chaîne de grattage qui transport la matière jusqu'à un transport souterrains, le transporteur assure l'alimentation de la trémie d'alimentation du broyeur appelée trémie de mélange.*

## **4- Broyage cru :**

*La matière de la trémie de mélange vas subir une deuxième correction en cas de besoin pour que le cru sortie broyeur répand aux consignes des trois modules de la farine, pour cela on trouve à coté de la trémie de mélange trois autres trémies une pour schiste l'autre pour minerai de fer et la dernière pour bauxite.*

*La fragmentation de mélange (matière pré homo +les correcteurs) est assurée par deux broyeurs verticaux de type loesch LM27-30 à 3 galets avec une capacité qui dépasse 120 t/h et une puissance de 1200kw.*



**Figure 4:broyeur cru**

Après écrasement de la matière entre la piste est les galets un *juux ue gaz chaud* provenant du four assure le séchage et le transport pneumatique du matière ,un séparateur intégré à la machine permet de régler la finesse du produit final : les grosses particules retombent sur le plateau de broyage tandis que les fines sont entraînées par le flux de gaz vers des séparateurs a fin de faire une séparation solide /gaz, la farine récupérer par les filtres et acheminée vers le silo farine .

#### **5- L'homogénéisation :**

Après broyage, le cru est expédié, à l'aide de deux élévateurs, vers deux silos d'homogénéisation qui assurent à la fois le stockage et l'homogénéisation de la farine de capacité :

- ❖ Silo 1 :7500 tonnes.
- ❖ Silo 2 :5000 tonnes.



**Figure 5:silo**

Cette homogénéisation permet d'alimenter les fours avec un cru de composition chimique constante dans le temps.

### **III- Préparation du combustible :**

*L'usine de Meknès utilise deux types de combustible :*

- ❖ *combustible solide : coke de pétrole + les pneus déchiquetés*
- ❖ *combustible liquide : fuel*

*Le coke de pétrole va subir une opération de broyage avec un broyeur verticale de type loesche LM 17-20D à 2 galets avec une puissance de 250 kW (même principe de fonctionnement que les broyeur cru), après le broyage le coke broyé est transporté vers un filtre qui alimente les trémie d'alimentation des deux four en coke.*

*Le fuel va subir un petit chauffage jusqu'à 120 °C afin de diminuer sa viscosité pour faciliter son transport vers les fours (utilisé surtout pendant l'allumage des fours)*

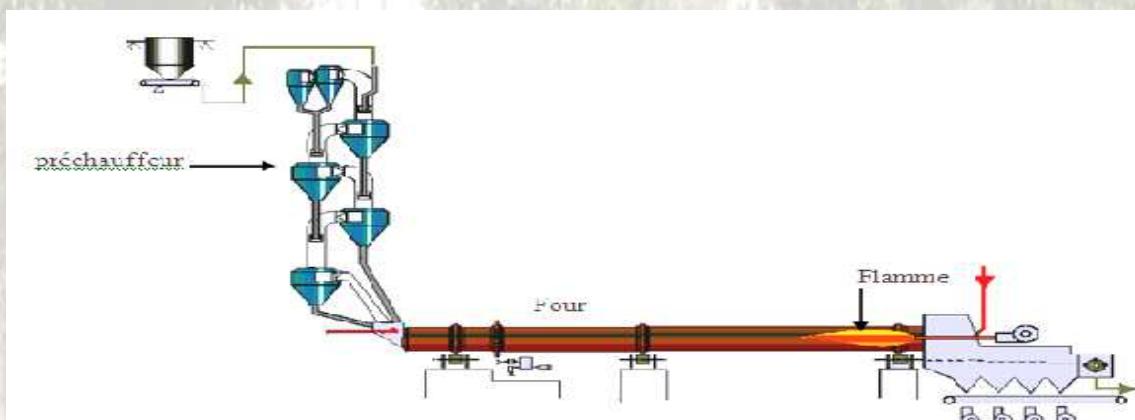
### **IV- Cuisson du cru :**

#### **1- Clinker :**

*Le clinker est le composé constitué par les nouvelles espèces formées au cours des réactions chimiques, qui se produisent lors de la cuisson du cru dans un four à haute température. Le clinker est essentiellement composé de quatre phases cristallines : les silicates bi et tricalciques l'aluminat tricalcique et l'aluminoferrite de calcium.*

#### **2- Production du clinker :**

*La farine crue obtenue à l'issue de processus de broyage et d'homogénéisation des matière première est transformée en clinker par traitement thermique, la transformation se réalise dans des fours rotatifs au sein desquels s'optère le traitement du cru à des températures de l'ordre de 1400°C à 1500°C, à l'usine de Meknès le traitement thermique s'effectue dans deux four rotatif munis*



*d'un préchauffage à 4 étages du cyclones.*

**LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES**





*Figure 6 : production de clinker*

#### 2-1- Préchauffage :

*L'usine de Meknès dispose de deux préchauffeurs à cyclones qui sont constitués de 5 cyclones placés à l'intérieur de chaque tour sur 4 étages. Lors de cette étape la farine est introduite dans la partie supérieure des tours de préchauffage à une température de 60 à 80°C.*



*Figure 7: Préchauffage*

*A l'intérieur de la tour les transferts thermiques s'effectuent par contact entre la matière et les gaz, la farine descend par gravité d'un cyclone au carneau du cyclone inférieur commence donc à chauffer progressives au fur et à mesure qu'il s'approche du four, à l'entrée du four sa température atteint environ 850°C. Elle est totalement déshydraté et partiellement décarbonatée, son degré de décarbonations s'étageant entre 50% et 80% selon le four 1 au 2 cette différence du taux*

décarbonatation le four 1 et 2 provoqué par l'installation d'un précalcinateur dans la ligne 1.

### 2-2- Four rotatif:

Le four rotatif est l'élément principale de fabrication du clinker, il est essentiellement constitué par des viroles en acier protégées par un revêtement intérieur des matériaux réfractaires (brique) .dans lequel brûlent les combustibles injectées à fort débit en

Produisant une flamme de plusieurs mètres de longueur.



*Figure 8:four rotatif*

Il fonctionne comme un échangeur de chaleur à contre courant dans lequel la flamme atteint 2000°C, elle est dirigée de l'aval vers l'amont du four et elle porte la farine à des très hautes températures jusqu'à 1400 à 1500°C. L'usine dispose de deux fours rotatifs légèrement inclinés,  
dont les caractéristiques sont les suivantes :

<i>Four n°</i>	<i>Longueur</i>	<i>Diamètre</i>	<i>Pente</i>	<i>Capacité (t/j)</i>	<i>Consommation calorifique (Kcal/Kg de clinker)</i>
1	96m	3,75m	3°	1800	860
2	64m	4m	3°	1200	840

*Tableau 2: les caractéristiques de deux fours*

### 2-3- Refroidissement :

*Le clinker sort à une température de 1200 à 1400°C tombe dans un refroidisseur, le refroidissement a notamment pour buts d'une part, d'abaisser la température du clinker à la*

*Température ambiante. Afin de garder intacte la nouvelle structure chimique De la matière et d'autre par, de récupérer au maximum la chaleur qu'il emmagasine.*

*Le refroidissement est provoqué par le passage de l'air frais tiré de l'atmosphère a travers la grille du refroidissement sur laquelle a été déposé le clinker.*

*L'usine dispose de deux refroidisseurs :*

- *refroidisseur de ligne 1 : mis en services fin mois d'avril 2008 c'est un refroidisseur à couloirs (5 couloirs) de type éta-coler l'écoulement du clinker est assurée par le déplacement des couloirs.*
- *refroidisseur de la ligne2 : de type Clausius perles 1grille H .la mobilité de clinker est assurée par les translation et le mouvement alternative des plaques de grille.*

### **3- Les réactions de cuisson :**

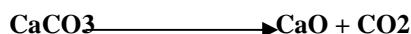
*La cuisson de la farine crue constitue la phase principale de la fabrication du clinker, et donc du ciment, c'est en effet au cours de la cuisson que s'opèrent les réaction chimiques de transformation du cru en clinker.*

#### **✓ La déshydratation :**

*Les granules de farine présente un certain taux d'humidité un chauffage a 100°C élimine l'eau libre non combinée l'eau adsorbée par les argiles est libérée et s'échappe entre 100 et 300°C.*

#### **✓ La décarbonatation :**

*Le cru étant séché, il s'échauffe sans grande réaction chimique jusqu'à une température de l'ordre de 750°C où intervient la décarbonatation de la phase calcaire :*

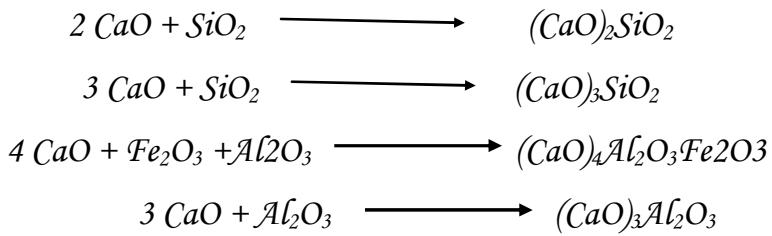


*De cette réaction endothermique résulte la formation de CaO naissante indispensable pour la formation des différentes phases du clinker.*

#### **✓ le clinkérisation :**

La transformation du cru en clinker se caractérise par un changement de la structure moléculaire, les composants de l'argile (principalement silicates d'alumine et oxyde de fer) se combinent à la chaux provenant du calcaire et donnant des silicates et des alumates de calcium, molécules qui réagiront avec l'eau pour la prise du ciment.

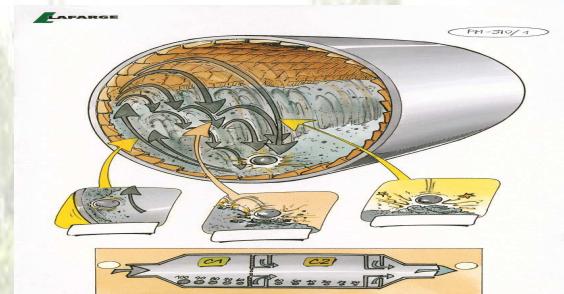
Les équations de réaction sont les suivants :



Une faible proportion de la chaux reste libre on l'appelle la chaux libre.

#### V- Broyage et expédition du ciment

##### 1- Broyage ciment :



**Figure 9: broyage ciment**

##### ✓ *Broyeurs à boulets :*

Une fois refroidis, le clinker est stocké dans un hall d'une capacité de 20 000 t, équipé de deux ponts roulants. Le clinker est broyé dans un broyeur à boulet avec des matières d'ajouts, qui sont le calcaire et le gypse qui est un régulateur de prise.

Le broyeur à boulets est constitué de :

- Deux compartiments et une cloison de séparation
- Blindage (fond d'entrée, blindage 1er compartiment, cloison double, blindage 2ème compartiment et fond de sortie)
- Charge broyante : ce sont les boulets qui sont de diamètre de 60 à 100 mm pour le premier compartiment et de 15 à 25 mm pour le deuxième.



**Figure 10:boulets**

L'atelier de broyage de l'usine est équipé de 3 broyeurs à boulets nommés BK3, BK4 et BK5, dont les caractéristiques techniques sont les suivantes :

Broyeur	Marque	Débit	Puissance	Diamètre Nominal	Longueur
BK3	PFEIFER	60 t/h	1600 KW	3400 mm	11250 mm
BK4	POLYSIUS	45 t/h	1600 KW	3200 mm	11060 mm
BK5	POLYSIUS	100 t/h	2700 KW	4200 mm	12000 mm

**Tableau 3:les caractéristiques des 3 broyeurs**

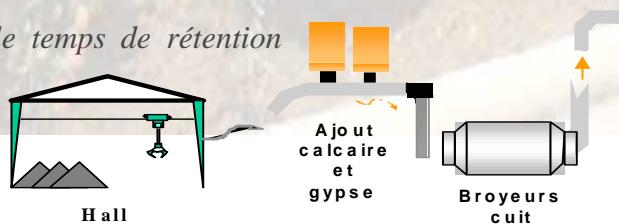
C'est la variation des dosages de ces divers produits et la finesse du broyage qui permet de définir les différents types de ciment.

LAFARGE usine de Mekenes fabrique actuellement 2 types de ciment :

- \* Le Ciment Portland avec ajouts CPJ 45 (% calcaire entre 19 et 23%)
- \* Le Ciment Portland avec ajouts CPJ 35 (% calcaire entre 29 et 34%)

#### ✓ Séparateur :

Le séparateur joue un rôle important dans le fonctionnement global de l'atelier du broyage du ciment, il augmente l'efficacité du broyeur car il optimise la récupération des fines, permet la détermination de la taille maximale des grains dans le ciment et diminue le temps de rétention dans le broyeur.



## **2-Stockage du ciment et Ensachage :**

*Le ciment est expédié par des pompes à vis à l'aide des compresseurs d'air vers des silos de stockage du produit fini.*



**Figure 11: Stockage du ciment**

*Lafarge dispose de 2 silos d'environ 5000 tonnes, et 4 silos de 2000 tonnes chacun.*

*La capacité de stockage totale est d'environ 18000 tonnes de ciment.*

*La livraison du ciment se fait soit en sacs, soit en vrac (transport par la route).*

*Pour ceci, l'usine dispose de 2 ensacheuses rotatives (Haver), de 4 ensacheuses statiques (Bates) et de deux stations de chargement du vrac.*

Type de Machine	Débit t/h	N° silo	Capacité des silos	Type ciment
Haver n°1	90	1 ou 2	Silo1 : 5000 t	CPJ35
Haver n°2	90	1 ou 2	Silo2 : 5000 t	CPJ35
Haver n°3	90	1 ou 7	Silo7 : 5000 t	CPJ45
Bates n°3	40	3 ou 4	Silo3 : 2000 t	CPJ45
Bates n°4	40	5 ou 6	Silo4 : 2000 t	CPJ35
Bates n°5	40	5 ou 6	Silo5 : 2000 t Silo6 : 2000 t	CPJ45 CPJ35

**Tableau 4: havers**

# Introduction

*La flamme c'est l'agent principal de cuisson, elle doit avoir une forme et une allure bien déterminées pour garantir une bonne cuisson de clinker.*

*Ce qui revient à dire qu'elle doit avoir une **impulsion** et un **swirl** bien réglés, donc un bon réglage des paramètres de la tuyère.*

*Mon sujet, consiste donc, à optimiser les paramètres de réglage du four 2 de l'usine de Meknès pour avoir une meilleure flamme.*

*Cette partie est traitée comme suit :*

**I- Généralités sur la tuyère, et méthode de calcul de l'impulsion et Swirl**

**II-Mesures, calculs et exploitation des résultats (avant réglages)**

**III-Optimisation et nouveaux réglages**

**IV- conclusion**

## I- Généralités sur la tuyère, et méthode de calcul de l'impulsion et Swirl

### A- Généralités sur la tuyère

#### 1- Définition de la tuyère :



*Figure 12 : tuyère Lafarge Meknès*

La tuyère est un tube cylindrique long d'environ 8m, pour un diamètre de 50cm dans lequel vont transiter deux éléments pour produire une flamme : le comburant et le carburant.

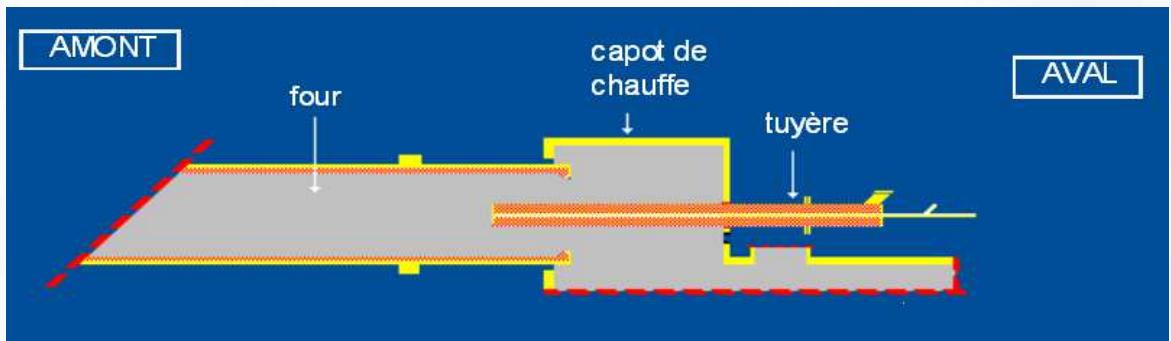
#### 2- Le rôle de la tuyère :

Son rôle est de préparer et contrôler la combustion du mélange air/combustible dans le four par :

- ☛ Un mélange intime combustible /comburant
- ☛ Un réglage de la flamme

#### 3- l'installation de la tuyère :

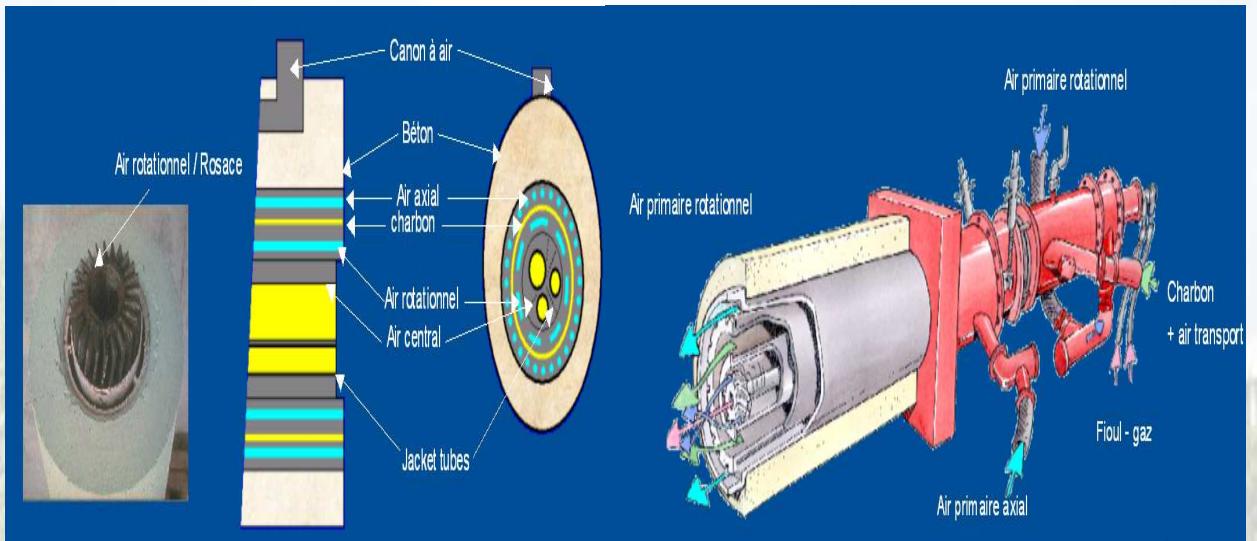
La tuyère est située à l'aval du four.



**Figure 13: l'installation de la tuyère**

traverse le capot de chauffe, son extrémité est située de 0 à 1m en amont du nose-ring

#### 4- La tuyère Lafarge et son fonctionnement :



**Figure 14 : La tuyère Lafarge**

Les tuyères sont constituées de plusieurs circuits concentriques transport l'air primaire et le(s) combustible(s).

L'air primaire est réparti généralement en deux circuits :

- ☛ Un circuit d'air « axial » injectant l'aire dans l'axe de la tuyère
- ☛ Un circuit d'air « rotationnel » injectant l'air en partie « radialement » grâce à une rosace dont les aubes sont inclinées à environ 20°.

Les combustibles sont amenés par d'autres circuits :

- ☛ Soit annulaires pour les combustibles solides (charbon),
- ☛ Soit au centre de la tuyère pour les gaz, les liquides ou les solides pulvérulents (sciures ....) ce sont les « jacket tubes ».

On trouve aussi au centre un « moyeu » central de relativement gros diamètre, qui a pour fonction d'accrocher la flamme en créant une zone morte de recirculation.

Un canon à air peut être installé au-dessus de la tuyère, sa fonction est détruire les concrétons et amas de matière accumulés qui pourraient dépasser du nez et transformer la flamme.

La tuyère est protégée des hautes températures par une gaine de béton réfractaire.

#### B-Méthodes de calcul de l'impulsion et swirl

Le réglage des tuyères consiste à régler les flux d'air axial et rotationnel.

##### 1-L'impulsion

➤ *définition :*

- ☛ C'est la quantité de mouvement axiale communiquée à la flamme par l'air primaire
- ☛ Ramenée à la puissance thermique, elle traduit un rapport de quantité de mouvement entre l'air primaire et l'air secondaire.

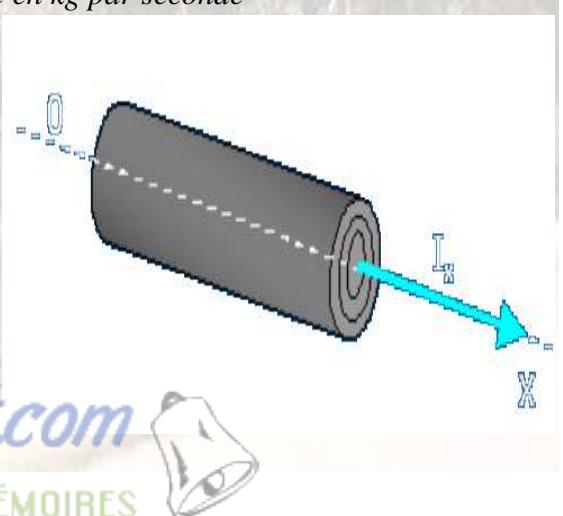
➤ *Calcul de l'impulsion :*

L'impulsion s'exprime par cette formule :  $I_x = Q_m \cdot V$

- ☛  $Q_m$  : représente le débit d'air primaire en kg par seconde
- ☛  $V$  : représente la vitesse axiale de cet air en m par seconde

On peut la présenter par une flèche (un vecteur) qui a pour direction l'axe  $OX$  de la tuyère, et sa longueur, la valeur de cette impulsion.

L'impulsion  $I$  est la somme de toutes les impulsions axiales dues aux airs axial, rotationnel, central, de transport et le combustible lui-même dans le cas du gaz.



➤ **Impulsion spécifique :**

Pour définir un critère d'impulsion indépendant de la puissance thermique du four, on définit l'impulsion spécifique comme étant le rapport :

$$I_s = I_x / Q$$

$I_s$  : s'exprime en  $N.h.GJ^1$

$P_{th}$  : puissance thermique au four

$I_x$  : Impulsion suivant l'axe du four du circuit

➡ Plus l'impulsion spécifique est élevée, plus la flamme se raccourcit et plus elle est chaude

**2-Le swirl**

➤ **définition :**

C'est le rapport entre l'impulsion  $I_{\theta r}$  radiale et l'impulsion  $I_x$  axiale, De ce fait, c'est un nombre sans unité.

➤ **Calcul du Swirl**

$$Sw = \frac{I_{\theta r} \times rg}{Ix \times De}$$

Formule dans laquelle :

$I_{\theta r}$  est l'impulsion tangentielle du circuit rotationnel

Avec :  $I_{\theta r} = I_x \operatorname{tg} \alpha$

$I_{\theta r}$  : impulsion tangentielle de l'air rotationnel

$I_x$  : impulsion axiale de l'air rotationnel

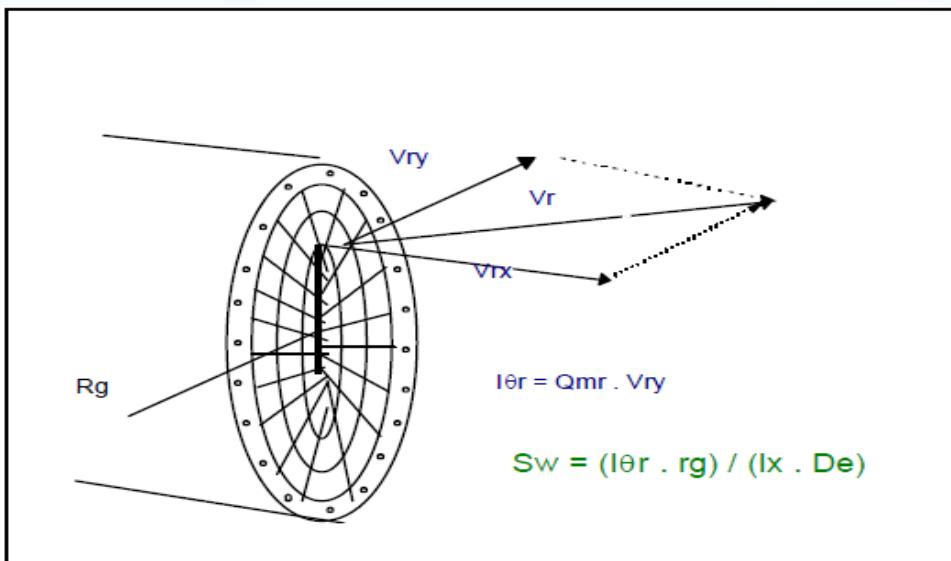
$\alpha$  : angle de la rosace

$r_g$  : Le rayon de giration se définit en fonction des rayons respectifs du circuit rotationnel au nez de la tuyère.

$$r_g = 2/3 (re3 - ri3) / (re2 - ri2)$$

$r_e$  : rayon extérieur de la rosace

$r_i$  : rayon intérieur de la rosace



$I_x$  est l'impulsion axiale déjà calculée ( $I_x = \sum I_{xi}$ ).

$D_e$  est le diamètre équivalent de l'écoulement du fluide, calculé comme le diamètre d'un orifice cylindrique au travers duquel circulerait le débit total d'air primaire à une vitesse telle qu'il produise l'impulsion  $I_x$ . On passe ainsi d'une configuration à  $n$  circuits à une configuration mono circuit.

$$D_e = \frac{2Q_m}{\sqrt{\prod \rho_m I_x}}$$

Avec  $Q_m$ : débit d'air primaire

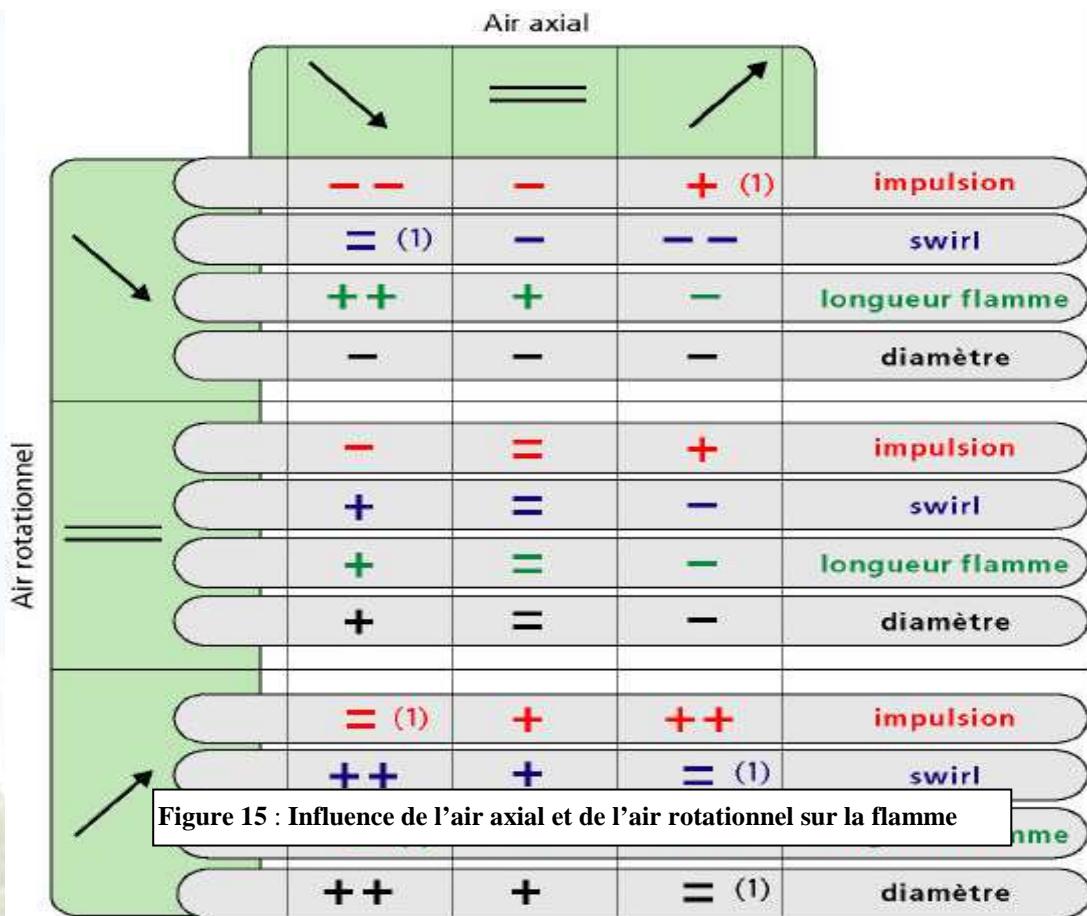
$\rho_m$ : masse volumique moyenne de l'air primaire au nez

$I_x$ : impulsion axiale totale

Le swirl est un nombre sans dimension, il permet donc de comparer les flammes de puissances thermiques différentes.

→ Plus le nombre de swirl est élevé plus le diamètre de la flamme est grand.

### 3-Influence de l'air axial et de l'air rotationnel sur la flamme



## **II- Mesures, calculs et exploitation des résultats**

## **1- les appareils utilisés pour la mesure**

→ *Le manomètre :*

*C'est un appareil utilisé Pour prendre des valeurs de pression statique de l'air axial, de l'air radial et de l'air transporteur, il donne les valeurs en mbar*

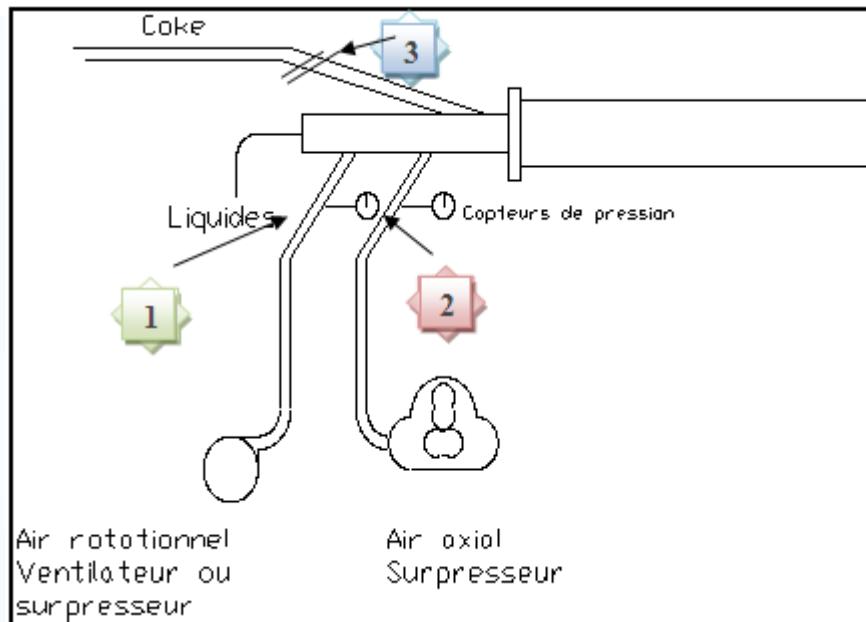
#### → *Le thermocouple :*

*C'est un appareil utilisé Pour mesurer la température de l'air axial, de l'air radial et de l'air transporteur qui circule à l'intérieur des tubes il donne les valeurs en °C*

#### → Tube de PITOT

*C'est un appareil utilisé Pour prendre des valeurs de la pression dynamique de l'air axial, de l'air radial et de l'air transporteur, il donne les valeurs en mm CE*

## **2 -un schéma explicatif des points de mesures**



D'après le schéma il y a trois points de mesure, pour chaque point on mesure la pression statique par le manomètre, la pression dynamique par le Tube de PITOT et la température par le thermocouple, afin de prendre des valeurs plus précises on mesure dix valeurs de pression dynamique pour chaque point d'enfoncement du tube puis on fait la moyenne.

Ces trois points représentent successivement :

- ➔ L'air rotationnel au refoulement du ventilateur
- ➔ L'air axial au refoulement du surpresseur
- ➔ L'air transporteur au refoulement d'un petit surpresseur

### 3 -les paramètres mesurés

Le but principal de ce calcul c'est de déterminer la valeur de l'impulsion spécifique et swirl pour chaque point de réglage ; pour les calculer nous avons besoin des débits volumiques qui peuvent être calculés à partir de la pression statique, dynamique et de la température.

#### 4-1 Au refoulement du ventilateur et du surpresseur (à l'entrée tuyère)

➤ **Les mesures :**

	Air axial	Air radial	Air transport
<i>moyen pression dynamique en mm CE</i>	89,87	4,87	53,27
<i>Pression statique en mm CE</i>	6837	675	1579
<i>La température en °C</i>	120	34	48
<i>Le diamètre en m</i>	0,16	0,2	0,16

Tableau 5: les mesures de refoulement ventilateur-

➤ **Les calculs :**

- On calcule les débits volumiques :

$$\text{On sait que : } Q = V \cdot S \quad \text{et} \quad S = \pi D^2 / 4$$

Avec

$Q$  : le débit d'air en  $\text{m}^3/\text{s}$

$V$  : la vitesse de l'écoulement en  $\text{m}/\text{s}$

$S$  : la section de tube en  $\text{m}^2$

$\rho$  : La masse volumique d'air

Et      **La pression dynamique ( $P_d$ ) = pression total ( $P_t$ ) - pression statique( $P_s$ )**

$$P_d = P + \rho g h + 1/2 \rho V^2 - P - \rho g h = 1/2 \rho V^2$$

$$V = \sqrt{(2 * P_d) / \rho}$$

$$\text{Donc} \quad Q = V * S = \sqrt{(2 * P_d) / \rho} * S$$

✓ **Pour l'air axial :**

- On calcul d'abord la masse volumique de l'air à la température de travail ( $120^\circ\text{C}$ )

**La loi des gaz parfaits**  $PV = n R T$  et  $P_{ab} = P_s + P_{atm}$

$$P = mRT/VM = \rho RT/M \quad \rho = P_{ab}M/RT$$

$$\text{Avec} \quad M = (0.209 * 32) + (0.791 * 28) = 28.836 \text{ g/mol}$$

$$P = (6837 * 10^2 / 10.19) + 10^5 = 1167095.29 \text{ Pa}$$

$$\rho = 167095.19 * 28.836 / 8314 * (120 + 273) = 1.432 \text{ Kg/m}^3$$

$$V = \sqrt{(2 * 89.87 * 102 / 10.19) / 1.432} = 35.095 \text{ m/s}$$

$$S = \pi * (0.16/2)^2 = 0.0201 \text{ m}^2$$

Alors  $Q = 0.0201 * 35.095 = 0.705 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q = 2539 \text{ m}^3/\text{h}$

✓ Pour l'air radial :

► On calcul d'abord la masse volumique de l'air à la température de travail (34°C)

La loi des gaz parfait  $PV = nRT$  et  $P_{ab} = P_s + P_{atm}$

$$P = mRT/VM = \rho RT/M \quad \rho = PM/RT$$

Avec  $M = 28.836 \text{ g/mol}$

$$P = (675 * 102 / 10.19) + 10^5 = 106624.14 \text{ Pa}$$

$$\rho = 106624.14 * 28.836 / 8314 * (34+273) = 1.148 \text{ Kg/m}^3$$

$$V = \sqrt{(2 * 4.877 * 102 / 10.19) / 1.148} = 9.131 \text{ m/s}$$

$$S = \pi * (0.2/2)^2 = 0.0314 \text{ m}^2$$

Alors  $Q = 0.0314 * 9.131 = 0.286 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q = 1032 \text{ m}^3/\text{h}$

✓ Pour l'air transporteur:

► On calcul d'abord la masse volumique de l'air à la température de travail (48°C)

La loi des gaz parfait  $PV = nRT$  et  $P_{ab} = P_s + P_{atm}$

$$P = mRT/VM = \rho RT/M \quad \rho = PM/RT$$

Avec  $M = 28.836 \text{ g/mol}$

$$P = (1579 * 10^2 / 10.19) + 10^5 = 115495.58 \text{ Pa}$$

$$\rho = 115495.58 * 28.836 / 8314 * (48+273) = 1.195 \text{ Kg/m}^3$$

$$V = \sqrt{(2 * 53.27 * 102 / 10.19) / 1.195} = 29.580 \text{ m/s}$$

$$S = \pi * (0.16/2)^2 = 0.0201 \text{ m}^2$$

Alors  $Q = 0.0201 * 29.5 = 0.589 \text{ m}^3/\text{s}$

$Q = 2120 \text{ m}^3/\text{h}$

☛ On convertit les débits dans les conditions normales :

On a :  $P_1 Q_1 = n R T_1$  et  $P_2 Q_2 = n R T_2$

On a une conservation de nombre de mole :  $P_1 Q_1 / T_1 = P_2 Q_2 / T_2 = n R$

Donc :  $Q_2 = P_1 Q_1 T_2 / P_2 T_1$

$\left. \begin{array}{l} P_1 V_1 T_1 Q_1 : \text{les paramètres à la température de travail} \\ P_2 V_2 T_2 Q_2 : \text{les paramètres à la condition normale (0°C)} \end{array} \right\}$

Avec :  $P_1 = P_{\text{barométrique}} + P_{\text{Statique}}$  et  $P_{\text{barométrique}} = 94535 \text{ Pa}$

✓ Pour l'air axial :

$$P_1 = 94535 + (6837 * 10^2 / 10.19) = 161983.479 \text{ Pa}$$

$$Q_2 = (161983.479 * 2539.581 * 273) / ((120+273) * 10^5)$$

$Q_2 = 2800.272 \text{ N m}^3/\text{h}$

✓ Pour l'air radial :

$$P_1 = 94535 + (675 * 10^2 / 10.19) = 101159.141 \text{ Pa}$$

$$Q_2 = (101159.141 * 1032.203 * 273) / ((34+273) * 10^5)$$

$Q_2 = 906.175 \text{ N m}^3/\text{h}$

✓ Pour l'air transporteur :

$$P_1 = 94535 + (1579 * 10^2 / 10.19) = 110030.584 \text{ Pa}$$

$$Q_2 = (110030.584 * 2120.062 * 273) / ((48+273) * 10^5)$$

$Q_2 = 1983.899 \text{ N m}^3/\text{h}$

4-2 -A la sortie tuyère :

A la sortie tuyère il a une augmentation de la température et une perte de pression statique de l'air axial

➤ **Les mesures :**

Le débit volumique à la condition normal reste constante même si il ya une augmentation de la Température et une perte de pression statique

	Air axial	Air radial	Air transport
<b>moyen Pression dynamique en mm CE</b>	89,87	4,87	53,27
<b>Pression statique en mm CE</b>	6546	675	1579
<b>La température en °C</b>	220	34	48
<b>La section en mm<sup>2</sup></b>	3619	4068	22740
<b>La masse volumique en Kg/m<sup>3</sup></b>		1,149	1,195
<b>Débit volumique normal (Nm<sup>3</sup>/h)</b>	2800	906	1983

Tableau 6: les mesures de la sortie tuyère

➤ **Calcul des vitesses d'éjection de l'air en sortie tuyère :**

☛ **calcul des masses volumiques à la sortie tuyère :**

✓ **Pour l'air axial**

On a un changement de température de 120 °C à 220 °C dû à l'échange thermique suite au contact de la tuyère avec l'air secondaire au niveau du capot de chauffe :

On sait que :  $P_1V_1=nRT_1$  et  $P_2V_2=nRT_2$

$\left. \begin{array}{l} P_1 V_1 T_1 \rho_1 : \text{les paramètres à } 0^\circ\text{C} \\ P_2 V_2 T_2 \rho_2 : \text{les paramètres à } 220^\circ\text{C} \end{array} \right\}$

$$R = P_1V_1/n \quad T_1 = P_2V_2/nT_2 = P_1V_1M/m \quad T_1 = P_2V_2 M/m$$

$$\rho_2 = P_2 \rho_1 T_1 / T_2 P_1$$

$$\rho_2 = 167095.19 * 1.253 * 273 / (220 + 273) * 10^5 = 1.122 \text{ Kg/m}^3$$

☛ **On calcul la masse volumique à la sortie on utilise la formule suivante :**

$$\rho_{\text{Sortie}} = \rho_{\text{conduit}} * (P_{S \text{ conduit}} + P_{atm}/P_{S \text{ axial}} + P_{atm})^{1/1.4}$$

Avec :

$$P_{S \text{ conduit}} = -2 \text{ mm CE} \quad \text{et} \quad \rho_{\text{conduit}} = 1.122 \text{ Kg/m}^3$$

$$P_{Sortie} = 1.122 * ((-2 * 10^2 / 10.19 + 10^5) / (6546 * 10^2 / 10.19 + 10^5))^{1/1.4}$$

$$P_{Sortie} = 0.776 \text{ Kg/m3}$$

✓ Pour l'air radial

☛ On utilise la même formule :

$$P_{Sortie} = P_{conduit} * (P_{S\_conduit} + P_{atm} / P_{S\_radial} + P_{atm})^{1/1.4}$$

Avec :  $P_{S\_conduit} = -2 \text{ mm CE}$  et  $P_{conduit} = 1,149 \text{ Kg/m3}$

$$P_{Sortie} = 1.149 * ((-2 * 10^2 / 10.19 + 10^5) / (675 * 10^2 / 10.19 + 10^5))^{1/1.4}$$

$$P_{Sortie} = 1.096 \text{ Kg/m3}$$

✓ Pour l'air transporteur

☛ On utilise la même formule :

$$P_{Sortie} = P_{conduit} * (P_{S\_conduit} + P_{atm} / P_{S\_transport} + P_{atm})^{1/1.4}$$

Avec :  $P_{S\_conduit} = -2 \text{ mm CE}$  et  $P_{conduit} = 1.195 \text{ Kg/m3}$

$$P_{Sortie} = 1.195 * ((-2 * 10^2 / 10.19 + 10^5) / (1579 * 10^2 / 10.19 + 10^5))^{1/1.4}$$

$$P_{Sortie} = 1.074 \text{ Kg/m3}$$

☛ Calcule des débits massiques et débits volumiques et les vitesses à la sortie tuyère :

On sait que :  $Q_m = Q_{VN} * P_{air \text{ à } 0} / 3600$  et  $Q_v = Q_m * 3600 / P_{sortie}$  et

$$V = Q_v / S$$

✓ Pour l'air axial

$$Q_m = 2800,272 * 1.253 / 3600 = 1.009 \text{ Kg/s}$$

$$Q_v = 1.009 * 3600 / 0.776 = 4665.01 \text{ m3/h}$$

$$V = 4665.01 / 3619 = 385.06 \text{ m/s}$$

✓ Pour l'air radial

$$Q_m = 906.175 * 1.253 / 3600 = 0.325 \text{ Kg/s}$$

$$Q_v = 0.325 * 3600 / 1.096 = 1069.5 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$V = 1069.5 / 4068 = 73.29 \text{ m/s}$$

✓ Pour l'air transporteur

$$Q_m = 1983,899 * 1.253 / 3600 = 0.712 \text{ Kg/s}$$

$$Q_v = 0.712 * 3600 / 1.074 = 2388.42 \text{ m}^3 / \text{h}$$

$$V = 2388.42 / 22740 = 29.17 \text{ m/s}$$

4-3 calcule de l'impulsion spécifique et swirl

► On calcul les impulsions axiales et tangentielles

✓ Pour l'air axial

On sait que :  $I_{xa} = Q_{ma} * V_a$  et  $I_{\theta a} = I_{xa} * \tan \alpha$

$$I_{xa} = 1.009 * 385.06 = 359.85 \text{ N}$$

$$I_{\theta a} = 359.85 * \tan 0 = 0 \text{ N}$$

✓ Pour l'air radial

On sait que :  $I_{xr} = Q_{mr} * V_{xr} = Q_{mr} * V_r * \cos \alpha$

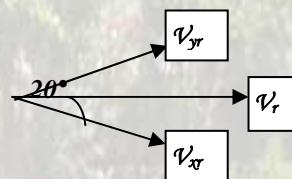
$$I_{\theta r} = Q_{mr} * V_r * \sin 20^\circ = I_{xr} * \tan \alpha$$

$$I_{xr} = 0.325 * 73.29 * \cos 20^\circ = 22.38 \text{ N}$$

$$I_{\theta r} = 0.325 * 73.29 * \sin 20^\circ = 8.14 \text{ N}$$

✓ Pour l'air transporteur

Rapport-gratuit.com  
On sait que :  $I_{xt} = Q_{mt} * V_t$  et  $I_{\theta t} = I_{xt} * \tan \alpha$   
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES



$$I_{xt} = 0.712 * 29.17 = 20.76 \text{ N}$$

$$I_{\theta t} = 20.76 * \tan 0 = 0 \text{ N}$$

☛ On calcul l'impulsion spécifique :

$$\text{On sait que : } Is = (I_{xa} + I_{xr} + I_{xt}) / P_{th}$$

$$\text{Avec } P_{th} = 32,69 \text{ Gcal/h}$$

$$Is = ((359,85 + 22,38 + 20,76) / 32,69) * (1 - 0,22)$$

$$Is = 9.61 \text{ N.h./Gcal}$$

☛ On calcul Swirl:

$$\text{On calcul d'abord } r_g : r_g = 2/3 (re3 - ri3) / (re2 - ri2)$$

$$r_g = 2/3 ((0.201/2) 3 - (0.184/2) 3) / ((0.201/2) 2 - (0.184/2) 2) = 0.0986 \text{ m}$$

☛ On calcul De

$$\text{Avec } Q_m = 1.009 + 0.325 + 0.712 = 2.042 \text{ Kg/s}$$

$$\rho_m = (0.776 + 1.096 + 1.074)/3 = 0.980 \text{ Kg/m}^3$$

$$I_x = 359.85 + 22.38 + 20.76 = 402.99 \text{ N}$$

$$D_e = (2 * 2.042) / \sqrt{\pi * 0.980 * 402.99} = 0.106 \text{ m}$$

$$\text{Donc } Sw = (8.14 * 0.0986) / (402.99 * 0.106)$$

$$Sw = 0.0187$$

4-4 -les résultats d'état initial :

➤ le Tableau :

**consigne vitesse sur presseur AA=1450 tr/min  
 consigne vitesse ventilateur AR=1800 tr/min  
 PRODUCTION =1200 T CK/j**

	Air axial	Air radial	Air transport
	Refoulement sur presseur-ventilateur		
La température (°C)	120	34	48
Pression dynamique (mm CE)	89,87	4,87	53.27
Pression statique (mm CE)	6837	675	1579
La masse volumique (Kg/m3)	1.432	1.148	1.195
Vitesse (m/s)	35.095	9.131	29.58
Section (m²)	0,02	0,03	0,02
Débit volumique (m³/h)	2539	1032	2120
Débit volumique (Nm³/h)	2800,27	906,175	1983,89
Débit massique (kg/h)	3635,84	1184,73	2533,4
	Sortie tuyère		
Débit volumique (Nm³/h)	2800,27	906,175	1983,89
Débit massique (kg/S)	1,009	0,325	0,712
La masse volumique (Kg/m3)	0,776	1,096	1,074

<i>La température (°C)</i>	220	34	48
<i>Débit volumique (m<sup>3</sup>/h)</i>	4665,01	1069,5	2388,42
<i>Section (mm<sup>2</sup>)</i>	3619	4068	22740
<i>Vitesse (m/s)</i>	358,06	73,29	29,17
<i>Impulsion axial</i>	359,8	22,38	20,76
<i>Impulsion tangentiel</i>	0	8,14	0

→ *Impulsion spécifique*  $I_s = 9,61 N.h/Gcal$

→ *Swirl*  $S_w = 0,0187$

➤ *Interprétation :*

*Dans les catalogues, on trouve que pour une bonne flamme, l'impulsion spécifique doit se situer entre 8 et 9 et le swirl doit être supérieur à 0,015.*

*Pour l'état initial, l'impulsion est supérieur à 9 et le swirl est acceptable.*

### III- Optimisation et nouveaux réglages

#### 1-résultats du 1er réglage :

➤ *le Tableau :*

**Tableau 7: des résultats à l'état initial**

*Consigne vitesse sur presseur AA=1400 tr/min*

*Consigne vitesse ventilateur AR=1400 tr/min*

*PRODUCTION =1200 T CK /j*

	<i>Air axial</i>	<i>Air radial</i>	<i>Air transport</i>
	<i>Refoulement sur presseur-ventilateur</i>		
<i>La température (°C)</i>	105	32,5	44
<i>Pression dynamique (mm CE)</i>	72,66	3,32	55.585
<i>Pression statique (mm CE)</i>	6185	443	1722
<i>La masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)</i>	1.431	1,128	1.224
<i>Vitesse (m/s)</i>	31,81	7,6	30,13
<i>Section (m<sup>2</sup>)</i>	0,02	0,03	0,02
<i>Débit volumique (m<sup>3</sup>/h)</i>	2307	859	2181
<i>Débit volumique (Nm<sup>3</sup>/h)</i>	2553	750	2065
<i>Débit massique (kg/h)</i>	3301,317		2669,544
<i>Sortie tuyère</i>			
<i>Débit volumique (Nm<sup>3</sup>/h)</i>	2553	750	2065
<i>Débit massique (kg/S)</i>	0,917	0,269	0,742
<i>La masse volumique (Kg/m<sup>3</sup>)</i>	0,729	1,093	1,089
<i>La température (°C)</i>	205	32,5	44

Débit volumique ( $m^3/h$ )	4168	887	2452
Section ( $mm^2$ )	3619	4068	22740
Vitesse ( $m/s$ )	330	64	30
Impulsion axial	302	17	22
Impulsion tangentiel	0	6	0

Tableau 8: résultats de 1er réglage

→ Impulsion spécifique  $I_s = 7,88 N.h/Gcal$   
 Swirl  $S_w = 0,014$

➤ Interprétation :

Ce réglage n'est pas bon puisque on obtient des valeurs de l'impulsion et swirl plus petites que les normes.

2 -résultats du 2eme réglage :

➤ le Tableau :

Consigne vitesse sur presseur AA=1400 tr/min  
 Consigne vitesse ventilateur AR=1800 tr/min  
 PRODUCTION =1200 T CK/j

	Air axial	Air radial	Air transport
	Réfoulement sur presseur-ventilateur		
La température ( $^{\circ}C$ )	105	31	44
Pression dynamique (mm CE)	72,66	4,765	55.585
Pression statique (mm CE)	6185	663	1722
La masse volumique ( $Kg/m^3$ )	1.431	1.158	1.224
Vitesse ( $m/s$ )	31,81	9,07	30,13
Section ( $m^2$ )	0,02	0,03	0,02
Débit volumique ( $m^3/h$ )	2307	1026	2181
Débit volumique ( $Nm^3/h$ )	2553	919	2065
Débit massique ( $kg/h$ )	3301,317	1621,08	2669,544
Sortie tuyère			
Débit volumique ( $Nm^3/h$ )	2553	919	2065
Débit massique ( $kg/S$ )	0,917	0,330	0,742
La masse volumique ( $Kg/m^3$ )	0,729	1,105	1,089
La température ( $^{\circ}C$ )	205	31	44
Débit volumique ( $m^3/h$ )	4168	1075	2452
Section ( $mm^2$ )	3619	4068	22740

<i>Vitesse (m/s)</i>	330	81	30
<i>Impulsion axial</i>	302	25	22
<i>Impulsion tangentiel</i>	0	9	0

→ *Impulsion spécifique  $I_S=8,1N.h/Gcal$*

→ *Swirl  $S_w=0,021$*

➤ **Interprétation :**

Ce 2ème réglage nous permet donc de trouver une impulsion et un swirl qui sont dans les normes et qui théoriquement permettent d'avoir une bonne flamme.

En effet on a appliqué au processus ce réglage et un contrôle au laboratoire nous a bien confirmé la meilleure qualité du clinker obtenu ce qui prouve que sa cuisson était de qualité.

**3-comparaison entre les 3 cas**

<i>Les cas</i>	<i>Production</i>	<i>L'impulsion</i>	<i>Swirl</i>
<i>Etat initial</i>	1200	9,61	0,018
<i>1<sup>er</sup> réglage</i>	1200	7,88	0,014
<i>2<sup>eme</sup> réglage</i>	1200		

**Tableau 9: résultats de 2<sup>eme</sup> réglage**

**Tableau 6: résultats de 2<sup>eme</sup> réglage**

**Tableau 10: comparaison entre les 3 cas**

➤ **Interprétation finale**

D'après les interprétations précédentes, on doit adopter le 2ème réglage, c'est-à-dire une vitesse de sur presseur égale à 1400 tr/min et une vitesse de ventilateur égale à 1800 tr/min.

C'est le réglage le plus convenable, puisqu'il permet d'une part d'obtenir une valeur de swirl maximal qui donne un élargissement et raccourcissement de la flamme, ce qui provoque une flamme plus dure et une distance d'inflammation plus courte, donc une bonne cuisson de clinker.

D'autre part, on obtient avec ce réglage, une valeur d'impulsion assez importante, ce qui assure une flamme plus chaude, et un meilleur mélange de l'air avec le combustible, d'où un meilleur fonctionnement de la tuyère.

---

# conclusion générale

*Le stage que j'ai effectué au sein de Lafarge Meknès, m'a permis d'une part, d'évaluer mes compétences théoriques acquises durant mes études et surtout de les pratiquer, d'autre part, d'avoir une vision sur le monde de travail et d'éprouver le sens de la responsabilité tout en découvrant jour après jour l'importance et l'utilité des atouts pratiques.*

*Ce présent stage a été donc une occasion pour maîtriser avec précision le procédé de fabrication du ciment, et surtout de m'initier à l'esprit recherche, puisque j'ai contribué activement à la recherche d'un nouveau réglage des paramètres permettant d'avoir une meilleure flamme pour bonne cuisson du clinker.*

*Ce nouveau réglage a été testé puis finalement adopté par la société Lafarge Meknès.*

*Nous pouvons donc dire que nous avons participé à l'amélioration des paramètres dans ce procédé de fabrication du ciment.*

*Je suis fière de ce résultat et je souhaiterai qu'il soit mon grand soutien dans mes activités futures.*