

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



Gm. 0506

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
Thiès

PROJET DE FIN D'ETUDES
2006/2007

En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception

Option ELECTROMECHANIQUE

Thème :

**PREDICTION DU TAUX D'HUMIDITE DU CIMENT
ET ETUDE DE SON IMPACT SUR LE BILAN THERMIQUE
DE LA CUISSON**

Application : Les Ciments Du Sahel S.A

Présenté le 25 juillet 2007

par

M. Mouhamadou Moustapha DIA

M. Adama SOW

Directeur interne : Dr. Salif GAYE

Directeur externe : M. Oumar DIALLO

REMERCIEMENT

Au terme de notre projet nous aimerions adresser nos sincères remerciements à tous ceux qui de près ou de loin nous ont apporté leur aide, en particulier :

- La Direction de l'ESP, pour nous avoir accueilli dans leur établissement
- La Direction des Ciments Du Sahel, pour nous avoir accordé ce projet de fin d'études
 - M Mamadou NDIAYE, directeur d'exploitation des Ciments Du Sahel
 - M. Salam THIOUNE, chef de la division maintenance et adjoint au Directeur d'exploitation des Ciments Du Sahel
- nos directeurs de projet :
 - M. Oumar DIALLO, chef de département Production des Ciments Du Sahel pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité.
 - M. Salif GAYE, chef de département de génie électromécanique de l'Ecole Polytechnique de Thiès, pour son aide précieuse, ses conseils avisés et sa disponibilité.
- à l'ensemble du personnel des Ciments Du Sahel pour leur disponibilité et leur collaboration. En particulier
 - M. Seydina Omar NIASS, chef de département contrôle qualité
 - M Alioune Badara DIENG, ingénieur de production
 - Ms. Taghiyoullah DIA et Louis SECK, chef de quart à la Production
- à l'ensemble du corps professoral de l'ESP centre de Thiès pour leurs enseignements au cours des trois années scolaires qui viennent de s'écouler
- à la famille de l'Ecole Supérieure Polytechnique dont nous sommes fiers de faire partie.
- à l'ensemble du personnel de l'ESP Thiès
- à nos camarades de promotions

SOMMAIRE

Le but de ce projet est de prédire le taux d'humidité du ciment et d'étudier son impact sur le bilan thermique de la cuisson. L'humidité du ciment est mesurée au Ciments Du Sahel par le laboratoire contrôle qualité de façon périodique. Sa valeur maximale admise dans le ciment est de 0,6 % selon les normes. Notre travail a permis ainsi de prédire le taux d'humidité du ciment à la sortie du broyeur en se basant sur les paramètres opératoires. L'étude permet dans la même lancée d'évaluer l'impact individuel de chaque paramètre sur l'humidité.

Nos prérequis en énergétique constituent la base de notre travail pour faire les bilans thermiques de la cuisson du clinker et du broyage de ciment et prédire le taux d'humidité. L'établissement des équations des bilans du broyeur ciment et de la ligne de cuisson nous a permis d'atteindre ces objectifs. L'équation du taux d'humidité a été déduite après l'établissement du bilan thermique du broyage. Un programme de calcul sur Excel a été réalisé et nous a permis de prédire sur neuf mesures le taux d'humidité du ciment. Une comparaison de ces mesures avec celles effectuées par le laboratoire nous a permis de déterminer une fonction de corrélation entre les valeurs théoriques et celles effectives.

Le bilan thermique de la cuisson nous a servi de base pour l'évaluation de l'impact de la maîtrise du taux d'humidité du ciment sur la cuisson du clinker. L'impact de la réduction du taux d'humidité sur la cuisson du clinker est une augmentation de la quantité du combustible. Nous avons établi un tableau de valeurs et tracé des courbes de la variation du taux humidité en fonction de paramètres pour illustrer cette interdépendance.

En raison du caractère privé de l'étude, les valeurs numériques du programme ne seront pas présentées dans ce rapport. Les résultats de ce travail sont à la disposition de l'entreprise et du directeur interne.

Mots – clés :

Humidité – ciment - énergie- Les Ciments du Sahel – broyage -prédiction– cuisson – impact

TABLE DE MATIERE Page

Remerciements.....	i
Sommaire.....	ii
Introduction.....	1

**PREMIERE PARTIE : GENERALITES SUR LES PROCEDES DE FABRICATION
DU CIMENT.....3**

Chapitre 1 : PROCESSUS.....4

1.1 Production du ciment : généralités et caractéristiques.....	4
1.1.1. L'extraction à la carrière.....	5
1.1.2. La préhomogénéisation.....	5
1.2 Les procédés de la ligne de cuisson :.....	5
1.2.1. Le four.....	5
1.2.1.1. Description :.....	5
1.2.1.2. Combustibles :.....	6
1.2.1.3. La chauffe du four :.....	6
1.2.2 La tour échangeur.....	6
1.2.2.1. Échangeur à grilles.....	7
1.2.2.2. Échangeur à cyclones	7
1.2.3 Le refroidisseur à clinker	8
1.2.4 Le fonctionnement de la ligne de cuisson	8
1.3 les procédés du broyage ciment.....	9
1.3.1. Pesage et dosage des matériaux broyés	10
1.3.2. Les types de broyeur.....	10

1.3.3. L'installation du broyeur.....	11
1.3.3.1. Le broyeur en circuit ouvert	11
1.3.3.2. Le broyage en circuit fermé.....	12
1.3.4. Le séparateur	12
1.3.5. Le circuit de gaz	13
Chapitre 2 : LE CIMENT DE L'USINE	14
2.1. Étude de la fabrication du clinker.....	14
2.2. Étude de la fabrication du ciment.....	15
2.3. Etude des systèmes d'acquisition de données.....	15
2.3.1. L'acquisition des données.....	16
2.3.1.1. la salle de contrôle commande	16
2.3.1.2. les réseaux de communication	17
2.3.1.3. les réseaux secondaires.....	17
2.3.1.3.1. le réseau contrôle Net.....	17
2.3.1.3.2. le réseau Device Net.....	17
2.3.1.3.3. le réseau DH'	18
2.3.1.4. les capteurs.....	18
2.3.2. Exemples de capteurs	19
2.3.2.1. Capteur de débit :.....	19
2.3.2.2. Capteur de température.....	21
2.3.2.2.1. Les thermocouples.....	21
2.3.2.2.2. Les pyromètres.....	23
2.3.2.3. Capteur de pression : le manomètre à membrane.....	23
DEUXIEME PARTIE : PREDICTION DU TAUX D'HUMIDITE	
DU CIMENT.....	25
Chapitre 1 : LE BILAN D'ENERGIE DU BROYAGE.....	27

1.1. mouvement d'énergie	27
1.1.1. Les entrées d'énergie.....	27
1.1.1.1. La matière fraîche.....	27
1.1.1.2. Les gaz chauds	28
1.1.1.3. Le retour matière :	28
1.1.1.4. Les airs faux :.. ..	28
1.1.1.5. L'apport des boulets :.....	28
1.1.1.6. L'air frais	28
1.1.1.7. L'eau injectée.....	28
1.1.1.8.. Les adjuvants.....	28
1.1.2. les sorties d'énergie.....	28
1.1.2.1. La matière sortie broyeur.....	28
1.1.2.2. La convection.....	28
1.1.2.3. Les gaz vers le filtre	28
1.2. Les équations du bilan.....	28
1.2.1. Les entrées d'énergie.....	29
1.2.1.1.Énergie liée à la matière fraîche.....	29
▪ Calcul du débit de la matière fraîche :	29
▪ Calcul de l'énergie de la matière fraîche :.....	31
1.2.1.2. Énergie liée au retour matière.....	32
▪ Calcul du débit de retour matière.....	32
▪ Calcul de l'énergie liée au retour matière sèche.....	32
1.2.1.3. Énergie du mélange gaz chauds et air frais	33
▪ Détermination du débit massique des gaz chauds	33
▪ Détermination du débit massique d'air frais.....	34
▪ Calcul de l'énergie du mélange gaz chauds et air frais.....	34
1.2.1.4. Énergie liée aux airs faux	35
1.2.1.5. Energie de l'eau dans le broyeur.....	35
▪ Détermination du débit massique d'eau dans le broyeur.....	35
▪ Calcul de l'énergie liée à l'eau injectée dans le broyeur	36
1.2.1.6. Énergie liée à l'apport des adjuvants :.....	37
1.2.1.7. Énergie liée aux boulets du broyeur	38

1.2.2 Les sorties d'énergie :.....	38
1.2.2.1. Énergie de la matière sèche sortie broyeur.....	38
▪ Détermination du débit massique de matière sèche sortie broyeur.....	39
▪ Calcul l'énergie liée à la matière sèche sortie broyeur.....	39
▪ Calcul l'énergie liée à l'humidité sortie broyeur.....	40
1.2.2.2. Énergie des gaz vers le filtre :.....	40
▪ Calcul de l'énergie de vapeur.....	40
▪ Calcul de l'énergie des poussières.....	41
▪ Calcul de l'énergie de l'air.....	41
▪ Calcul de l'énergie liée aux gaz vers le filtre.....	42
1.2.2.3. Convection.....	42
▪ Calcul l'énergie liée à la convection naturelle.....	42
▪ Calcul l'énergie liée à la convection forcée.....	42
Chapitre2: DEDUCTION DU TAUX D'HUMIDITE DU CIMENT	43
2.1. Calcul du taux d'humidité.....	43
2.2. Corrélation de l'équation du taux d'humidité avec celle trouvée au laboratoire	44
2.2.1. Démarches	45
2.2.1.1. Régression linéaire.....	45
2.2.1.2. Régressions exponentielle.....	45
2.2.1.3. Régression logarithmique.....	46
2.2.1.4. Régression puissance.....	46
2.2.2. Résultats.....	46
2.2.2.1. Sans gaz chauds	46
2.2.2.1.1. Régression linéaire.....	46
2.2.2.1.2. Régression exponentielle.....	46
2.2.2.1.3. Régression logarithmique	46
2.2.2.1.4. Régression puissance	46
2.2.2.2. Avec gaz chauds.....	47
2.2.2.2.1. Régression linéaire.. ..	47
2.2.2.2.2. Régressions exponentielle.....	47
2.2.2.2.3. Régression logarithmique.....	48
2.2.2.2.4. Régression puissance.....	48

2.2.2.2.5. Régression polynomiale.....48

**TROISIEME PARTIE : ETUDE DE L'IMPACT DE L'HUMIDITE
SUR LE BILAN THERMIQUE DE LA CUISSON49**

Chapitre 1 : NOTIONS DE BASE.....50

1.1. Théories de la combustion.....50

1.1.1. Combustibles et comburant.....50

1.1.2. Distribution des airs.....50

1.1.2.1. L'air primaire50

1.1.2.2. L'air secondaire.....50

1.1.2.3. l'air tertiaire.....51

1.1.3. Les brûleurs51

1.1.3.1. Un brûleur principal.....51

1.1.3.2. Les brûleurs secondaires.....51

1.1.4. Energie calorifique et pouvoir calorique.....51

1.1.4.1. Le pouvoir calorifique supérieur (PCS)51

1.1.4.2. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI)51

1.1.5. Efficacité et rendement énergétique.....51

1.1.6. La calcination.....52

1.1.6.1. Réactions chimiques et physiques.....52

1.1.6.2. Pertes au feu.....53

1.2 . Les différents modes de transmission de chaleur.....53

1.2.1. La conduction.....53

1.2.2. La convection.....53

1.2.3. Le rayonnement54

Chapitre 2 : LE BILAN D'ENERGIE DE LA CUISSON55

2.1 Mouvement d'énergie thermique55

2.1.1. Au niveau de la tour échangeur.....	55
2.1.2. Au niveau du four.....	56
2.2. Les équations du bilan.....	56
2.2.1. Les apports : Sources de chaleur.....	56
2.2.1.1. Combustion.....	56
2.2.1.2. Chaleur sensible.....	57
▪ Combustible.....	57
▪ farine crue.....	57
2.2.1.3. Air primaire.....	58
2.2.1.4. Air de refroidissement	59
2.2.1.5. Retour de poussière du bag house.....	59
2.2.2. Les pertes	60
2.2.2.1. Rayonnement	60
2.2.2.2. Convection.....	60
2.2.2.3. pertes avec les gaz de sortie	61
▪ produits de combustion avec l'excès d'air :.....	61
▪ réaction de décarbonatation : CO ₂ dans l'alimentation du four..	61
▪ l'eau libre avec l'alimentation du four.....	62
▪ l'eau liée avec l'alimentation du four.....	62
▪ Pertes avec les poussières.....	63
2.2.2.4. Pertes au niveau du refroidisseur.....	63
▪ clinker.....	63
▪ excès d'air.....	64
2.2.2.5. Chaleur de formation	65

**Chapitre 3 : ETUDE DE L'IMPACT DU TAUX D'HUMIDITE
SUR LE BILAN DE LA CUISSON**

3.1. Les paramètres du taux d'humidité liés à la cuisson.....	66
3.2. Influence de la variation d'humidité sur les paramètres opérationnels	67
3.2.1. Calcul du débit du mélange de gaz chauds	67

3.2.2. Calcul de la variation du taux d'humidité.....	68
3.3. Evaluation financière	68
3.3.1. Calcul du débit de fuel injecté	69
3.3.2. Calcul du coût de la consommation de fuel.....	69
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	72
BIBLIOGRAPHIE.....	73

LISTE DES ANNEXES :

Annexe 1 :Analyse dimensionnelle du bilan d'énergie du broyage cimentxxiii

Annexe 2: Analyse dimensionnelle du bilan d'énergie du broyage cimentxxiv

Annexe 3: détermination des chaleurs massiques.....xxvi

Annexe 4 : caractéristiques du ventilateur 541 FN310.....xxvii

Annexe 5: courbes caractéristiques du ventilateur 541 FN310xxviii

Annexe 6: détermination du degré de calcination à partir de la perte au feu.....xxix

Annexe 7: Appareils de mesure pour le bilan du broyage cimentxxx

LISTE DES FIGURES

Fig. I.1 : Préchauffeur à cyclones et précalcinateur (four ILC).....	7
Fig. I.2 : Les procédés d'une ligne de cuisson à quatre cyclones.....	9
Fig. I.3 : Coupe transversal d'un broyeur à boulets.....	11
Fig. I.4 : Broyage en circuit ouvert	11
Fig. I.5 : Broyage en circuit fermé.....	12
Fig. I.6 : Carte de localisation de CDS.....	14
Fig. I.7 : Fabrication du ciment	15
Fig. I.8 : Schéma de principe du processus d'acquisition de données.....	16
Fig. I.9 : Principe du débitmètre de Coriolis.....	20
Fig. I.10: Principe du thermocouple.....	21
Fig. II.1 : Mouvement d'énergie dans le broyeur ciment	27
Fig. II.2 : Humidité du laboratoire en fonction de l'humidité calculée cas sans gaz chauds..	47
Fig. II.3 : Humidité du laboratoire en fonction de l'humidité calculée cas avec gaz chauds..	48
Fig. III.1 : Mouvements d'énergie thermique de la ligne de cuisson.....	55
Fig.III.2 : Répartition de l'excès d'air du refroidisseur à clinker	67
Fig.III.3: Débit des gaz chauds en fonction de la réduction du taux l'humidité du ciment ...	70
Fig.III.4: Pertes refroidisseur en fonction de la réduction de l'humidité du ciment.....	70
Fig.III.5: Coût du fuel en (F CFA/h) en fonction de la réduction de l'humidité du ciment ...	71

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.-1.: Type Métal 1/ Métal 2 Gamme de température	22
Tableau III.-1.: Variation de la température des gaz chauds et de la quantité du fuel en fonction de la variation du taux d'humidité.....	71

LISTE DES ABREVIATIONS

CDS : Les Ciments Du Sahel

ESP : Ecole Supérieure Polytechnique

FLSmidth : société danoise ,premier fabricant mondial de cimenterie

ILC : in line calcination

LOI : lost on ignition

PCI : pouvoir calorifique inférieur

PFE : projet de fin d'études

NOMMENCLATURE

Variables du bilan d'énergie du broyage ciment

A : surface de contact en m^2

$C_{P_{ad}}$: Chaleur massique de l'adjuvant en $kcal/kg/^\circ C$

$C_{P_{air}}$: Chaleur massique de l'air en $kcal/kg/^\circ C$

$C_{P_{AG}}$: Chaleur massique du mélange air frais et gaz chauds en $kcal.kg^{-1}.^\circ C^{-1}$
contenu dans le calcaire de la matière fraîche en $kcal/kg/^\circ C$

$C_{P_{ca}}$: chaleur massique du calcaire en fonction de la température en $kcal /kg/^\circ C$

$C_{P_{ck}}$: chaleur massique du clinker en fonction de la température en $kcal /kg/^\circ C$

$C_{P_{eca}}$: Chaleur massique de l'humidité

$C_{P_{eCk}}$: Chaleur massique de l'humidité contenu dans le clinker de la matière fraîche
en $kcal/kg/^\circ C$

$C_{P_{ei}}$: Chaleur massique de l'eau liquide injectée dans le broyeur pour le
refroidissement du ciment en $kcal/kg/^\circ C$

$C_{P_{egy}}$: Chaleur massique de l'humidité contenu dans le clinker de la matière fraîche en
 $kcal/kg/^\circ C$

$C_{P_{ei}} = C_{P_{eCk}} = C_{P_{eca}} = C_{P_{egy}} = C_{P_{eau}} = 1kcal / kg / ^\circ C$ l'eau est à l'état liquide.

$C_{P_{em}}$: Chaleur massique de l'humidité contenue dans la matière sortie broyeur en
fonction de la température en $kcal/kg/^\circ C$ ($C_{P_{em}} = C_{P_{eau}}$)

$C_{P_{ev}}$: chaleur massique de l'eau évaporée en fonction de la température en $kcal/kg/^\circ C$

$C_{P_{gy}}$: chaleur massique du gypse en fonction de la température en $kcal/kg/^\circ C$

C_{P_p} : chaleur massique de la poussière en $kcal/kg/^\circ C$ ($C_{P_p} = C_{P_{ciment}}$)

$C_{P_{rs}}$: Chaleur massique du retour matière en $kcal/kg/^\circ C$ en fonction de la température

$C_{P_{rs}} = C_{p..ciment}$

$C_{P_{Sm}}$: chaleur massique de matière à la sortie broyeur en fonction de la
température en $kcal/kg/^\circ C$

Cette chaleur massique est celle du ciment.

d: diamètre de la conduite d'air frais

$h_{E_{1Ca}}$: le taux d'humidité du calcaire en pourcentage

$h_{E_{1Ck}}$: le taux d'humidité du clinker en pourcentage

$h_{E_{1Gy}}$: le taux d'humidité du gypse en pourcentage

$h_{E_{4R}}$: le taux d'humidité du retour matière en pourcentage

H_{Ad} : l'énergie liée à l'apport d'adjuvants en Mcal/h

$H_{E_{AG}}$: l'énergie liée au mélange air frais et gaz chauds en Mcal/h

$H_{E_{1Ca}}$: l'énergie du calcaire en Mcal/h

$H_{E_{1Ck}}$: l'énergie du clinker en Mcal/h

$H_{E_{1Gy}}$: l'énergie du gypse en Mcal/h

$H_{E_{1H}}$: l'apport d'énergie du mélange d'eau en Mcal/h

$H_{E_{1HCa}}$: énergie de l'humidité du calcaire contenu dans la matière fraîche en Mcal/h

$H_{E_{1HCK}}$: énergie de l'humidité du clinker contenu dans la matière fraîche en Mcal/h

$H_{E_{6Hei}}$: énergie de l'eau injectée dans le broyeur pour le refroidissement du ciment en Mcal/kg/K

$H_{E_{1HGy}}$: énergie de l'humidité du gypse contenu dans la matière fraîche en Mcal/h

$H_{E_{4HR}}$: énergie de l'humidité dans le retour matière en Mcal/h

$H_{E_{1P}}$: l'apport d'énergie des boulets en Mcal/h

$H_{E_{1S}}$: l'apport d'énergie du mélange sec en Mcal/h

$H_{S_{2A}}$: l'énergie de l'air en Mcal/h

$H_{S_{3cn}}$: l'énergie par convection naturelle en Mcal/h de clinker

$H_{S_{1em}}$: l'énergie de l'eau à la sortie du broyeur en Mcal/h

$H_{S_{2G}}$: l'énergie des gaz vers le filtre en Mcal/h

$H_{S_{1m}}$: l'énergie de la matière sèche à la sortie du broyeur en Mcal/h

H_{S_2P} : l'énergie de la poussière en Mcal/h

H_{S_1Sm} : l'énergie de la matière sèche sortie broyeur en Mcal/h

H_{E_1SR} : l'énergie lié au retour matière sèche en Mcal/h

H_{S_2V} : l'énergie de vapeur en Mcal/h

L : la chaleur latente de l'eau en kcal/kg

P : la puissance du moteur du broyeur en kW

P_t : pression totale du gaz propre en Pa

Q_{AG} : le débit massique du mélange air frais et gaz chauds en t/h

$Q_{E_1Sc_a}$: le débit massique sec du calcaire en t/h

Q_e : le débit massique d'eau injectée dans tout le système t/h

Q_{ei} : le débit massique d'eau injectée dans le broyeur en t/h

Q_{E_2g} : le débit massique des gaz chauds à l'entrée du broyeur en t/h

Q_{oca} : le débit massique d'humidité contenu dans le calcaire de la matière fraîche en t/h

Q_{eck} : le débit massique d'humidité contenu dans le clinker de la matière fraîche en t/h

Q_{egy} : le débit massique d'humidité contenu dans le gypse de la matière fraîche en t/h

Q_{E_1Hca} : Le débit massique de l'humidité dans le calcaire en t/h

Q_{E_1ck} : le débit massique humide du clinker en t/h

Q_{E_1gy} : Le débit massique humide du gypse en t/h

Q_{E_1Hck} : le débit massique de l'humidité dans le clinker en t/h

Q_{E_1Hgy} : Le débit massique de l'humidité dans le gypse en t/h

Q_{E_4HR} : le débit massique d'eau dans le retour matière en t/h

Q_{E_4R} : le débit massique humide du le retour matière en t/h

$Q_{E_1Sc_k}$: le débit massique sec du clinker en t/h

Q_{E_1Sgy} : le débit massique sec du gypse en t/h

Q_{E_4SR} : le débit massique sec de retour matière en t/h

Q_{S_2A} : le débit massique de l'air en t/h

Q_{S_2ev} : le débit massique de l'eau évaporée en t/h

Q_{S_1m} : le débit massique humide de matière sortie broyeur en t/h

Q_{S_1Sm} : le débit massique sec de matière sortie du broyeur en t/h

Q_{S_1em} : le débit massique de l'humidité contenue dans la matière sortie broyeur en t/h

Q_{S_2P} : le débit massique de poussière en t/h

Q_{S_2V} : le débit massique de la vapeur en t/h

Q_v : Le débit volumique en m^3/h

Q_{vg} : débit volumique de l'excès d'air en m^3/s obtenu à partir des caractéristiques du ventilateur de tirage.

S : la section de la conduite d'air frais en m^2

T : température de surface du broyeur en K

T_0 : température ambiante en K

V : vitesse de l'air en m/s

V_a : la vitesse de l'air frais à l'entrée du broyeur en m/h

x_0 : le taux d'humidité du ciment en pourcentage

X_{ref} : valeur de référence sur la courbe du ventilateur

ΔT_{air} : variation de la température de l'air en $^{\circ}C$

ΔT_{AG} : variation de la température du mélange air frais et gaz chauds en $^{\circ}C$

ΔT_{Ad} : variation de la température de l'adjuvants en $^{\circ}C$

ΔT_{af} : variation de la température de l'air frais en $^{\circ}C$

ΔT_{ca} : Variation de la température du clinker en $^{\circ}C$

ΔT_{ck} : variation de la température du clinker en $^{\circ}C$

ΔT_{eca} : variation de la température de l'eau injectée contenue dans le calcaire de la matière fraîche $^{\circ}C$

ΔT_{eck} : variation de la température de l'humidité contenue dans le clinker de la matière fraîche $^{\circ}C$

ΔT_{ei} : variation de la température de l'eau injectée pour le refroidissement du ciment en °C

ΔT_{egy} : variation de la température de l'humidité contenue dans le gypse de la matière fraîche °C

ΔT_{em} : variation de la température de l'humidité contenue dans la matière sortie broyeur en °C

ΔT_{gy} : Variation de la température du gypse en °C

ΔT_p : variation de la température de la poussière en °C

ΔT_{RS} : Variation de la température du retour matière en °C

ΔT_{sm} : variation de la température de la matière sèche sortie broyeur en °C

$\Delta T_{s_1, sm}$: variation de la température de la matière sèche sortie broyeur en °C

ΔT_{sr} : variation de la température de l'humidité dans le retour matière en °C

η : Rendement = 0,85

ρ_g : Densité du gaz propre en kg/m^3 à la température de l'air

ρ_A : la masse volumique de l'air frais en t/m^3

ρ_{Ad} : la masse volumique de l'adjuvant en kg/m^3

ρ_0 : la masse volumique de l'air à la température de référence en t/m^3

Variables du bilan d'énergie de la cuisson

C_{pAp} : Chaleur massique de l'air primaire en $\text{kcal.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ donnée en **annexe 3** en fonction de la température

C_{pAr} : Chaleur massique de l'air de refroidissement en $\text{kcal.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ donnée en **annexe 3** en fonction de la température

C_{pck} : Chaleur massique de clinker au niveau du refroidisseur $\text{kcal.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ donnée en **annexe 3** en fonction de la température

C_{pel} : Chaleur massique de l'eau liée dans l'alimentation du four en $\text{kcal.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

C_{pex} : Chaleur massique de l'excès d'air au niveau du refroidisseur $\text{kcal.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ donnée en

annexe 3 en fonction de la température

$C_{p\ fa}$: Chaleur massique de la farine de l'alimentation en kcal.kg⁻¹.K⁻¹ donnée en

annexe 3 en fonction de la température

$C_{p\ f}$: Chaleur massique du fuel dans le brûleur principal en kcal.kg⁻¹.K⁻¹

$C_{p\ fs}$: Chaleur massique du fuel dans le brûleur secondaire en kcal.kg⁻¹.K⁻¹

$C_{p\ po}$: Chaleur massique de poussière en kcal.kg⁻¹.K⁻¹ est égale a la chaleur massique de la farine en **annexe 3** en fonction de la température

$C_{p\ rp}$: Chaleur massique de retour poussière du bag house en kcal.kg⁻¹.K⁻¹ donnée en

annexe 3 en fonction de la température

CSF : consommation spécifique de fuel en kcal/kg de clinker.

D : diamètre du corps et pour les surfaces planes $D_{\text{fictif}} = \frac{L+1}{2}$ en m

H_{Ap} : Énergie de l'air primaire en kcal/kg de clinker

H_{Ar} : Énergie de l'air de refroidissement en kcal/kg de clinker

H_{CO_2} : énergie de CO₂ contenu dans l'alimentation du four en kcal/kg de clinker

H_{cf} : énergie liée a la convection forcée au niveau du four en kcal/kg de clinker

H_{cn} : énergie liée a la convection naturelle au niveau du four en kcal/kg de clinker

$H_{\text{eau_libre}}$: énergie liée a l'eau libre dans l'alimentation du four en kcal/kg de clinker

$H_{\text{eau_libre_spécifique}}$: énergie spécifique de l'eau libre en kcal/kg de clinker

$H_{\text{eau_liée}}$: énergie a l'eau liée dans l'alimentation du four l'eau liée en kcal/kg de clinker

H_{ex} : perte de chaleur par l'excès d'air en kcal/kg de clinker

H_{fa} : Énergie de la farine crue en kcal/kg de clinker

H_{per} : Énergie des gaz de fumées en kcal par kg de clinker

$H_{\text{poussière}}$: énergie de poussière en kcal/kg de clinker

H_{rp} : Énergie de retour poussière du bag house en kcal/kg de clinker

H_R : radiation ou rayonnement au niveau du four en kcal/kg de clinker

H_{sFour} : Énergie du fuel au niveau du brûleur principal en kcal/kg de clinker

$H_{\text{sprécal}}$: Énergie du fuel au niveau des brûleurs secondaires en kcal/kg de clinker

H_{lab} : Énergie des gaz de fumées en kcal/kg de clinker donnée en annexe en fonction de l'excès d'air et de la température des gaz de fumées

LOI : perte au feu

n : vitesse du ventilateur en rpm

N : puissance du ventilateur en W

P_i : pression totale du gaz propre en Pa

PCI : pouvoir calorifique inférieur du combustible en kcal/kg de clinker

Q_{Ap} : Débit massique de l'air primaire en kg/h

$Q_{mclinker}$: débit massique de clinker en kg/h ; calculer avec la quantité de farine consommée et le facteur de clinkérisation durant la période.

Q_{mCO_2} : débit massique de CO_2 en kg/h

Q_{meau_libre} : débit massique de l'eau libre en kg/h

Q_{mex} : débit massique de l'excès d'air en kg/h

Q_{mf} : débit massique du fuel au niveau du brûleur principal en kg/h

Q_{mfa} : débit massique de la farine crue en kg/h

Q_{mfb} : débit massique du fuel au niveau des brûleurs secondaires en kg/h

Q_{mfuel} : débit massique du fuel en kg/h ; calculer avec la supervision durant la période

$Q_{mpoussière}$: débit massique de poussière en kg/h

Q_{mnp} : débit massique de retour poussière en kg/h

$Q_{m_eau_liée}$: débit massique d'eau liée en kg/h

Q_{vAp} : Débit volumique de l'air primaire en m^3/h

Q_{VoAr} : débit volumique de l'air de refroidissement des ventilateurs en m^3/h

Q_{ViAr} : débit volumique de l'air de refroidissement d'un ventilateur en m^3/h

Q_{Vex} : débit volumique de l'excès d'air en m^3/s obtenu à partir des caractéristiques du ventilateur de tirage

T : température de surface pour la convection en K

T_{Ap} : la température de l'air primaire en K

T_0 : température ambiante au niveau de la virole en K

T_{or} : température de la surface pour le rayonnement en K

T_r : température du milieu environnant la surface en K

V : vitesse de l'air en m/s

X_{ref} : valeur de référence sur la courbe du ventilateur

ΔT_a : Variation de la température de CO_2 contenu dans l'alimentation du four en K

ΔT_{Ap} : Variation de la température de l'air primaire en K

ΔT_{Ar} : Variation de la température de l'air de refroidissement en K

ΔT_{ck} : Variation de la température de clinker au niveau du refroidisseur en K

ΔT_{el} : Variation de la température de l'eau liée contenue dans l'alimentation en K

ΔT_{ex} : Variation de la température de l'excès d'air au niveau du refroidisseur en K

ΔT_f : Variation de la température du fuel au niveau du brûleur principal en K

ΔT_{fb} : Variation de la température du fuel au niveau du brûleur secondaire en K

ΔT_{fa} : Variation de la température de la farine en K

ΔT_{po} : Variation de la température de la poussière en K

ΔT_{rp} : Variation de la température de retour poussière en K

ρ_{ex} : Masse volumique de l'air d'air calculée avec l'équation (6) en Kg/m^3

ρ_{Ap} : Masse volumique de l'air primaire en Kg/m^3

ρ_o : Masse volumique de l'air dans les CNTP en Kg/m^3

ρ_{oAr} : Masse volumique de l'air de refroidissement calculée avec l'équation (6) en Kg/m^3

% Excès_ air : pourcentage de l'excès d'air

INTRODUCTION

Les Ciments Du Sahel (C.D.S), deuxième cimenterie du Sénégal, est une société anonyme de droit sénégalais Cette usine, d'une superficie de 100 ha a démarré ses activités de production en 2002 .Elle est localisée à 80 km au Sud- Est de Dakar dans la zone de Kirène, communauté rurale de Diass sous préfecture de Sindia, département de Mbour. Elle est reliée à la route nationale n°1 par un tronçon de 7km bitumé.

Le ciment est l'un des matériaux de construction les plus utilisés de nos jours en particulier dans le domaine du bâtiment.

Sa fabrication étant très complexe, il s'obtient généralement à partir du broyage d'un mélange de clinker et des ajouts (calcaire, gypse, pouzzolane, laitier etc.). Elle nécessite une forte consommation énergétique.

En effet en dehors des paramètres physico- chimiques liés à la fabrication du clinker et du ciment, le taux d'humidité du produit final obtenu est un facteur dont la maîtrise est primordiale. Le ciment étant un produit anhydre c'est-à-dire avide d'eau, une présence excessive d'humidité amorce sa préhydratation .Cette dernière est très néfaste pour la qualité du ciment dans la mesure où elle induit un phénomène de fausse prise, où l'augmentation du temps de prise avec surtout une diminution de la résistance à la compression. De plus, la présence d'humidité dans le ciment favorise le colmatage des silos et par conséquent réduit la capacité de stockage.

A cela, il faut ajouter que la cimenterie est une industrie énergétivore car elle est équipée de machines lourdes.

Dès lors, on comprend l'importance de toute politique de maîtrise du taux de l'humidité du ciment. Etant donné que c'est aussi un facteur qui augmente la consommation d'énergie, la maîtrise de son évolution devient importante.

C'est dans ce cadre que ce projet de fin d'études nous été proposé par l'usine Les Ciments Du Sahel dont l'intitulé est le suivant : « Prédiction du taux d'humidité du ciment et étude de son impact sur le bilan thermique de la cuisson ».

Pour mener à bien ce travail qui nous a été confié, nous avons subdivisé ce rapport en trois grandes parties.

La première partie porte sur les généralités de fabrication du ciment. Une étude générale du processus global de production du ciment suivi de celle qui intéresse particulièrement notre projet.

La deuxième partie est consacrée à la prédiction du taux d'humidité du ciment. L'établissement du bilan énergétique du broyage ciment et l'équation relative au calcul du taux d'humidité y sont effectués. Aussi une mise en œuvre de ces différentes équations sur Excel suivie d'une collecte de données pour un affinement de ces équations de bilans énergétiques y sont réalisées.

Enfin, la troisième partie se rapportant à l'étude de l'impact du taux d'humidité sur la cuisson du clinker va être une synthèse des résultats obtenus dans la partie précédente. A la suite d'une analyse des paramètres qui influencent le facteur taux d'humidité, des propositions de schémas de conduite à adopter permettant la réduction de la consommation en combustible ou une diminution du taux d'humidité vont être établis. Enfin, nous terminerons par une étude financière sommaire.

PARTIE I :

GENERALITES SUR LES PROCEDES **DE FABRICATION DU CIMENT**

Chapitre 1 : PROCESSUS

1.1. Production du ciment : généralités et caractéristiques

Le ciment est une matière pulvérulente formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante capable d'agglomérer en durcissant des substances variées. Il désigne également, tout matériau interposé entre deux corps durs pour les lier.

Le mot "ciment" peut désigner différents matériaux comme par exemple : le plâtre, la chaux, la pouzzolane naturelle, le ciment prompt, et le ciment Portland ou ciment artificiel qui est le ciment le plus courant.

Les ciments peuvent être classés en deux grandes familles :

a) les ciments Portland :

- Le ciment Portland (CEM I)
- Le ciment Portland composé (CEM II)

b) les ciments composites ou mélangés :

- Les ciments de hauts fourneaux (CEM III)
- Les ciments pouzzolaniques (CEM IV)
- Les ciments au laitier et aux cendres ou ciment composé (noté CEM V)

La société les Ciments Du Sahel (C.D.S) met sur le marché plusieurs variétés de ciments dont les plus commercialisées sont :

- le ciment Portland ordinaire CEM I/A-M 42,5R ;
- le ciment Portland composé CEMII/A-M 32,5R (95% de la production);
- le ciment Portland composé CEM III B 42,5

Le processus de fabrication du ciment comprend trois grandes opérations :

- la préparation du cru
- la cuisson
- le broyage et le conditionnement

1.1.1. L'extraction à la carrière

Elle consiste à extraire les matières premières (argile, calcaire et latérite principalement) à partir de carrières naturelles à ciel ouvert. Ces matières premières sont extraites des parois rocheuses par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. La roche est ensuite acheminée vers un atelier de concassage.

C'est au niveau de cet atelier que s'effectue le concassage de très grands blocs de pierre.

1.1.2. La préhomogénéisation, le broyage de la farine crue

La phase de préhomogénéisation consiste à créer dans un hall, un mélange homogène en disposant la matière en couches horizontales superposées. La matière est reprise après traitement. De la farine crue est obtenue après l'étape de broyage. La farine crue est homogénéisée et stockée dans des silos. Dans le cas d'un taux d'humidité élevé, la pâte est stockée dans des cuves ou dans des silos.

Des systèmes pneumatiques et mécaniques assurent le transport de la farine crue dans les silos de stockage.

Le système le plus couramment utilisé actuellement associe des aéro-glissières ou des convoyeurs à vis. C'est le procédé utilisé aux Ciments Du Sahel.

1.2. Les procédés de la ligne de cuisson

La ligne de cuisson est le processus d'obtention du clinker à partir de la farine crue. Elle est composée au niveau des Ciments du Sahel de:

- la tour échangeur, constituée d'un ensemble de cinq (5) cyclones et d'un précalcinateur
- un four rotatif
- un refroidisseur à clinker

1.2.1 Le four

1.2.1.1. Description

Un four rotatif se compose d'un cylindre en acier dont le rapport longueur/diamètre est compris entre 12 et 13. Il est supporté par plusieurs appuis. Dans le cas des Ciments du Sahel, le four a deux appuis et une inclinaison suivant une pente de 3,5 %. Un mécanisme

d'entraînement lui fait effectuer de 0,5 à 4,5 tours par minute autour de son axe. L'association rotation pente fait progresser lentement la matière dans le four.

Pour résister aux pointes de température très élevées, l'intérieur du four est revêtu de briques réfractaires.

Le four est muni d'ouvertures au sommet et à la base du cylindre pour le chargement, la coulée et le passage du brûleur.

1.2.1.2 combustibles

Différents combustibles peuvent fournir la chaleur nécessaire au procédé. Les trois combustibles les plus utilisés dans les fours à clinker sont par ordre d'importance décroissante:

- charbon pulvérisé et le coke de pétrole,
- le fuel (lourd),
- le gaz naturel.

Pour nos calculs ultérieurs nous considérerons le fuel comme combustible de chauffe du four.

1.2.1.3. La chauffe du four

La chauffe du four est assurée par le brûleur principal avec la pulvérisation du combustible.

La chauffe du four se fait de façon directe. Le fuel correctement préparé et chauffé doit être pulvérisé en gouttelettes de tailles appropriée et mélangé à l'air de combustion.

1.2.2 La tour échangeur

Il existe plusieurs procédés de fabrication du clinker :

- à voie semi humide : le mélange est en partie débarrassé de son eau avant cuisson
- à voie humide : le cru est broyé et malaxé en présence d'eau pour former une pâte liquide avant cuisson.
- à voie semi sèche : le cru est aggloméré en boulettes avant cuisson.
- à voie sèche : les matières premières broyées et séchées forment le cru ou farine qui a l'aspect d'une poudre fluide. Le cru est ensuite introduit dans un four tubulaire long en voie sèche ou dans le préchauffeur ou le précalcinateur du four comme le cas des Ciments Du Sahel.

Il existe plusieurs types de tours échangeurs dont nous pouvons en citer :

1.2.2.1. Échangeur à grille

C'est le système utilisé pour préchauffer le cru sous forme de granules (voies semi sèche). La grille supporte une couche de granules qui est traversée par un flux de gaz chaud.

1.2.2.2. Échangeur à cyclones

C'est une tour de préchauffage de la farine ou les particules sont chauffées en suspension dans un flux de gaz chaud. Il existe différents types de préchauffeurs:

Les Ciments Du Sahel sont équipés d'un préchauffeur à cinq cyclones et précalcinateur.

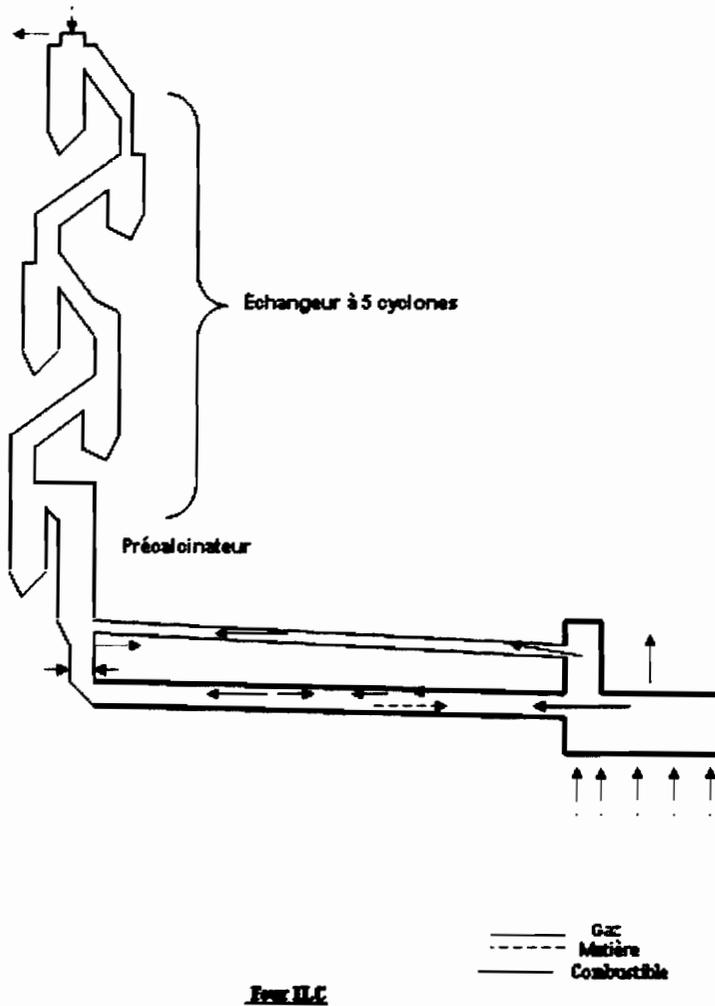


Fig. I.1. : Préchauffeur à cyclones et précalcinateur (four ILC)

1.2.3. Le refroidisseur à clinker

Le refroidisseur à clinker fait partie de la ligne cuisson. Elle a une influence déterminante sur les performances et l'économie de l'installation.

Sa fonction est double :

- récupérer le maximum de chaleur dans le clinker chaud (1 450°C) pour la recycler dans le procédé ;
- abaisser la température du clinker à un niveau compatible avec le bon fonctionnement des équipements en aval.

Les deux types de refroidisseurs les plus courants sont :

- o **les refroidisseurs rotatifs**
- o **les refroidisseurs à grilles**

Dans notre cas nous nous intéresserons aux refroidisseurs à grilles.

Dans ce type d'équipement, la couche de clinker déposée sur une grille est refroidie par des ventilateurs en la balayant par un courant d'air ascendant.

Comme l'air chaud provenant de la zone de refroidissement n'est pas totalement utilisé pour la combustion, il peut servir au séchage de matières premières et des constituants du ciment ou du charbon.

1.2.4 Le fonctionnement de la ligne de cuisson

Le système du four aux Ciments Du Sahel est celui d'un four I.L.C (in line calcination ou calcination en ligne). Ce four est équipé d'un préchauffeur de 5 étages. Le caisson du précalcinateur ou calcinateur est intégré dans la conduite montante du four.

Le four ILC est un four de calcination avec des gaz de température normale dans le calcinateur. Ces températures variant entre 870 et 900°C à l'étage inférieur du cyclone. Avec une telle température, la réaction de décarbonatation du carbonate de calcium (CaCO₃) va se produire rapidement.



C'est une réaction endothermique où le CO_2 représente les pertes au feu.

Le seuil normal de calcination de la matière introduite dans le four est de 90 à 95%. L'air chaud venant du refroidisseur est mélangé aux gaz du four avant d'être utilisé pour la combustion. Cela signifie que la combustion dans le calcinateur est alimentée par un mélange de gaz relativement faible en oxygène (11 à 12%). Le courant d'air qui passe à la fois dans le four et le calcinateur est contrôlé par le même ventilateur. Ce qui nécessite un système de régulation dans le canal d'air chaud, de façon à disposer de moyens de contrôle sur le tirage.

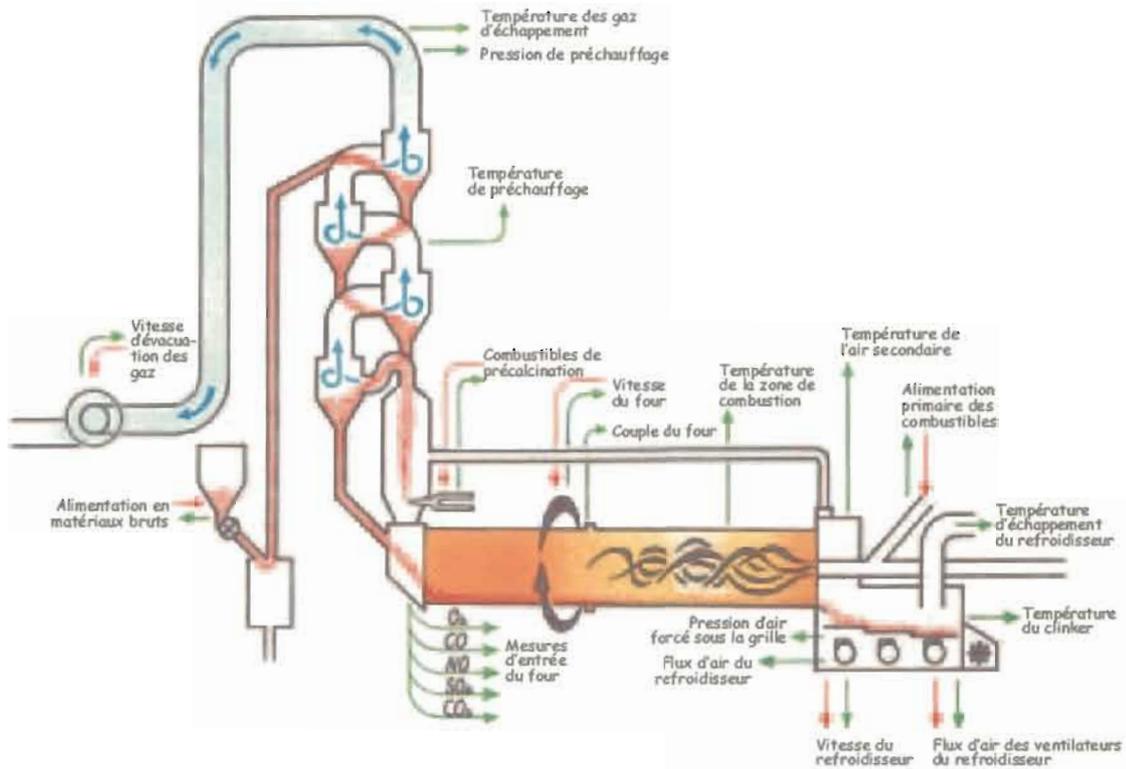


Fig. 1.2. : Les procédés d'une ligne de cuisson à quatre cyclones

1.3. les procédés du broyage ciment

La dernière phase de fabrication dans une cimenterie est le broyage du clinker provenant généralement du four avec un pourcentage de gypse et éventuellement de d'autres additifs.

1.3.1. pesage et dosage des matériaux broyés

La précision et la fiabilité du pesage et du dosage des matériaux introduits dans le broyeur sont déterminantes pour le maintien d'un bon rendement énergétique de l'atelier de broyage. De ce point de vue, les tapis d'alimentation peseur sont les équipements les plus importants pour l'alimentation de la station de broyage.

1.3.2. les types de broyeur

Plusieurs types de broyeurs sont utilisés dans l'industrie de la cimenterie. Parmi ces broyeurs nous pouvons citer :

- broyeur à rouleaux ;
- broyeur à cylindres à lit de matière ;
- broyeur à rouleau horizontal ;
- broyeur conventionnel à boulets

Les cimenteries utilisent essentiellement des broyeurs à boulets. C'est le cas des Ciments Du Sahel. Ce broyeur est composé de deux compartiments.

Le premier contient des corps de broyage de grandes tailles destinées à la désintégration des matériaux bruts.

Le second contient des corps de broyage de petite taille servant essentiellement à réduire en fine les matériaux pré broyés.

Les deux compartiments sont séparés par un diaphragme ou cloison. Ils sont chargés avec le nombre de boulets correspondant à la force de broyage recherchée.

Dans ces types de broyeurs, une grande partie de l'énergie fournie est transformée en chaleur. Le reste sert à la fragmentation des matériaux, mais aussi à leur réagglomération. Les grains sont traités collectivement à l'intérieur du broyeur par des boulets qui opèrent par chocs.

Un injecteur d'eau stabilise automatiquement la température de sortie dans toutes les conditions de fonctionnement de la machine

La sortie du broyeur est équipée d'un sas d'évacuation de trop plein d'air. Le matériau sortant du broyeur est transporté par une goulotte pneumatique puis successivement par un convoyeur, un élévateur à godets, une seconde goulotte pneumatique vers l'entrée du séparateur. La figure (Fig. I.3.) montre une illustration d'un broyeur à boulets.

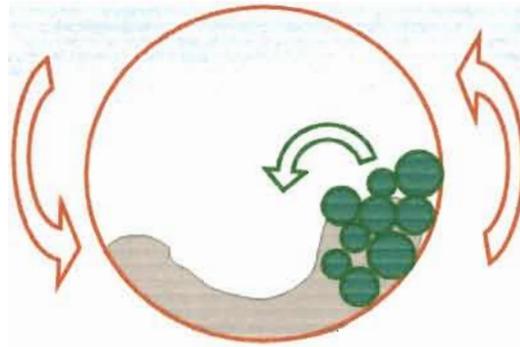


Fig. I.3. : coupe transversale d'un broyeur à boulets

1.3.3. L'installation du broyeur

Le broyage du ciment consomme de l'énergie. La qualité du ciment final dépend largement du mode opérationnel et des divers paramètres relatifs au broyeur ciment.

Il existe deux types de broyage du ciment :

1.3.3.1. Le broyeur en circuit ouvert

Le broyeur en circuit ouvert (fig. I.4.) est moins utilisé de nos jours pour des raisons telles que :

- non adaptation lorsqu'il s'agit d'un broyage fin ou de broyer deux ou plusieurs types de ciments.
- problèmes de croûtage et d'agglomération fréquents

La fonction de broyage du broyeur est stable, c'est-à-dire qu'une augmentation de la production du broyeur donne un produit plus grossier alors qu'une production réduite donne un produit plus fin.



Fig. I.4 : Broyage en circuit ouvert

1.3.3.2 Le broyage en circuit fermé

Ce type de broyeur (fig. I.5.) permet d'obtenir un ciment broyé très fin. Dans ce cas ; un simple réglage du séparateur permet de changer le type de ciment. Son installation est plus complexe et plus coûteuse.

Ce type de broyage est généralement divisé en deux compartiments :

- un compartiment 1 de prébroyage où se trouvent les plus grands boulets.
- un compartiment 2 de finissage avec les plus petits boulets.

Quand les matières ont traversé le broyeur, elles sont envoyées à un séparateur qui les divise en deux fractions dont un produit fini plus fin et un autre plus grossier qui va retourner vers le broyeur pour y subir un broyage supplémentaire.

L'alimentation du broyeur est bien plus grande que celle qui a lieu en circuit ouvert.

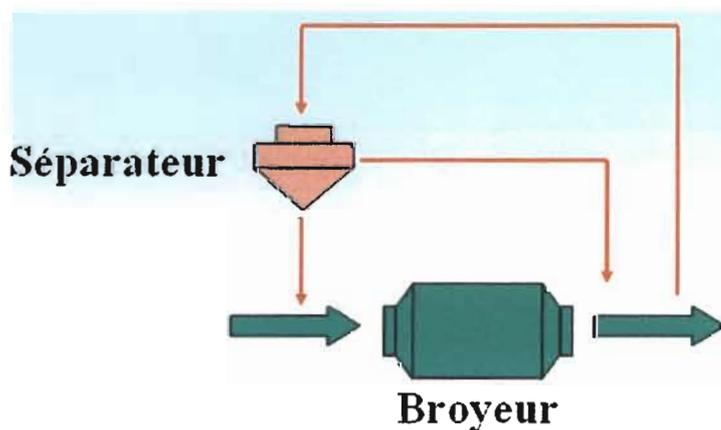


Fig. I.5. : Broyage en circuit fermé

Dans ce qui suit, nous nous intéresserons au broyage de ciment en circuit fermé que nous trouvons actuellement aux Ciments Du Sahel.

1.3.4 Le séparateur

Le produit broyé entre dans le séparateur par un récupérateur à grumeaux et deux goulottes pneumatiques. Le récupérateur a pour rôle de retenir et d'évacuer les grumeaux ainsi que les corps broyants.

C'est dans le séparateur où s'effectue le tri du matériau broyé en produit fini et en rejets. Ces derniers sont refoulés aussi vers le broyeur par une goulotte pneumatique. Pour un contrôle du

volume rejeté, le produit repris est mesuré par un débitmètre placé dans la trappe et le registre à double volet qui sépare la goulotte pneumatique et celui placé à l'entrée du broyeur.

Le produit fini quitte le rotor par le haut et passe dans deux cyclones. Le rotor est actionné par un moteur à vitesse variable. En faisant varier la vitesse du moteur, il est possible de régler la finesse du produit fini.

Le ciment est retenu pour être séparé de l'air. Cet air est alors mis en circulation grâce à un ventilateur placé en aval des deux cyclones puis est divisé en deux : une partie étant réinjecté dans le séparateur (air nécessaire), l'autre partie (air excédentaire ou parasite) sortant du circuit par l'intermédiaire du filtre et un ventilateur de dépoussiérage.

1.3.5 Le circuit de gaz

Le broyeur est ventilé par certaines quantités de gaz servant à évacuer les vapeurs d'eau et à établir à l'entrée de la machine une dépression permettant d'éviter les émissions de poussières dans l'atmosphère.

Les gaz de ventilation du broyeur sont dépoussiérés par un filtre à manches particulier. Une certaine quantité de particules transportées par ces gaz peut contenir des éléments ayant une granulométrie plus élevée que celle du produit visé. C'est le cas lorsque la circulation des gaz est à grande vitesse. En fonction de la finesse, la poudre piégée par le filtre est soit retenue, soit refoulée vers l'entrée du séparateur, soit réintégrée dans le flux de transport du produit fini au moyen d'un registre à volet directionnel. Par défaut, les poudres sont dirigées vers le séparateur.

Chapitre 2 : LE CIMENT DE L'USINE

Notre cadre d'application est l'usine les Ciments Du Sahel.

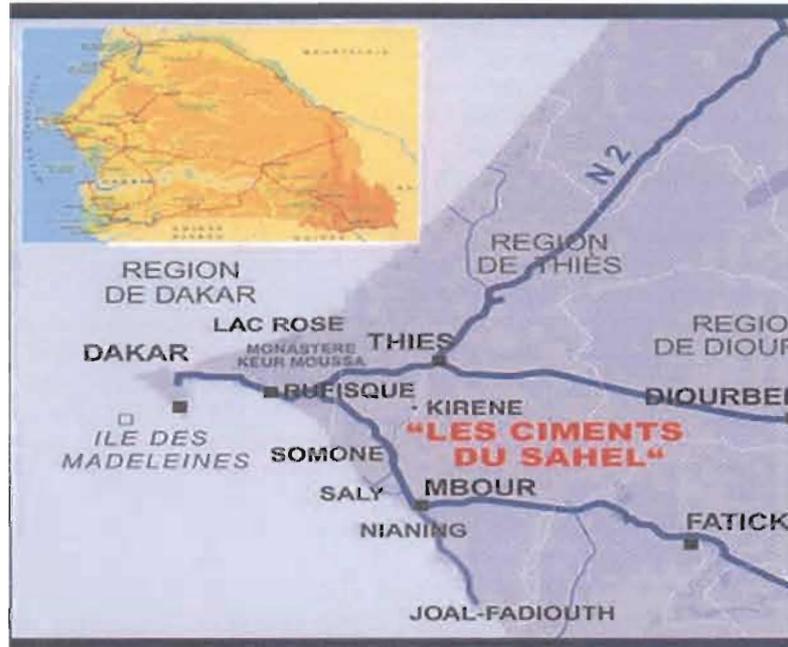


Fig. I.6. Carte de localisation de CDS

2.1 Étude de la fabrication du clinker

La matière sortie du broyeur cru est convoyée par des transporteurs appelés aéro-glissières jusqu'au silo de farine communément appelé silo homogénéisation. Composée d'un mélange de calcaire - argile, de latérite, et de calcaire haut titre, la farine est extraite du silo homogénéisation et passe dans une série de cyclones appelés la tour échangeur.

Dans ces cyclones elle est chauffée à contre courant avec de l'air chaud, décarbonatée au niveau du calcinateur avant d'entrer dans le four.

Quatre étapes principales sont réalisées lors du procédé de clinkérisation :

- le séchage, le préchauffage jusqu'à 500°C
- la calcination (décarbonatation des produits carbonatés CaCO_3 de 700 à 1050°C),
- la clinkérisation de 1200 à 1450 °C,
- le refroidissement de 1450 à 80 °C

Il est important de noter que le clinker utilisé aux Ciments du Sahel peut aussi être importé.

2.2 Étude de la fabrication du ciment

La troisième étape dans une cimenterie, correspond à l'addition de matières complémentaires au clinker et au broyage de l'ensemble. Cette étape consiste donc à doser les différents constituants, puis à les mélanger et à les broyer de façon à obtenir une poudre homogène et très fine : le ciment.

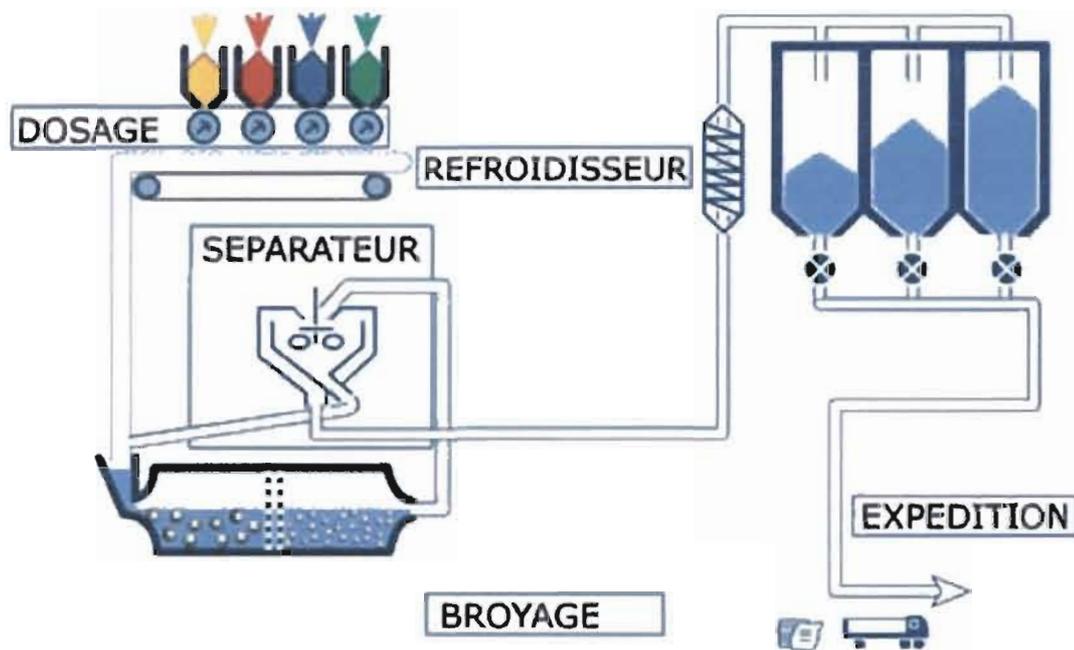


Fig. I.7. : Fabrication du ciment

Après son stockage, le clinker sera donc finement broyé grâce à des boulets en acier traité. La machine traditionnellement utilisée dans cette étape est le broyeur à boulets.

A cette matière ainsi préparée, on n'y ajoutera systématiquement de 3 à 5% de gypse, afin de réguler le temps de prise du ciment, ce qui facilite sa mise en œuvre.

2.3 Étude des systèmes d'acquisition de données processus

L'acquisition des données revêt une importance capitale dans l'automatisation industrielle.

Au niveau des Ciments Du Sahel, le département de production assure la supervision du fonctionnement à distance des installations à partir de la salle de commande.

2.3.1 L'acquisition des données

2.3.1.1 la salle de contrôle commande

Les Ciments du Sahel disposent d'une salle de commande à supervision automatisée pour le contrôle et le suivi du processus de la production .Elle est constituée de deux serveurs redondants et de plusieurs ordinateurs. Un contrôle technique continu est ainsi effectué aussi bien pour le produit fabriqué que pour les équipements de production.

La salle de contrôle commande fait parti des systèmes automatisés des Ciments du Sahel au même titre que le réseau d'automates programmables industriels, et aussi les capteurs et les actionneurs.

Ces derniers sont reliés entre eux par des réseaux de communication suivants :

- le réseau Ethernet ;
- le réseau Device Net ;
- le réseau Control Net ;
- le réseau DH⁺ .

Le schéma (Fig. I .8.) montre la synthèse du contrôle des installations.

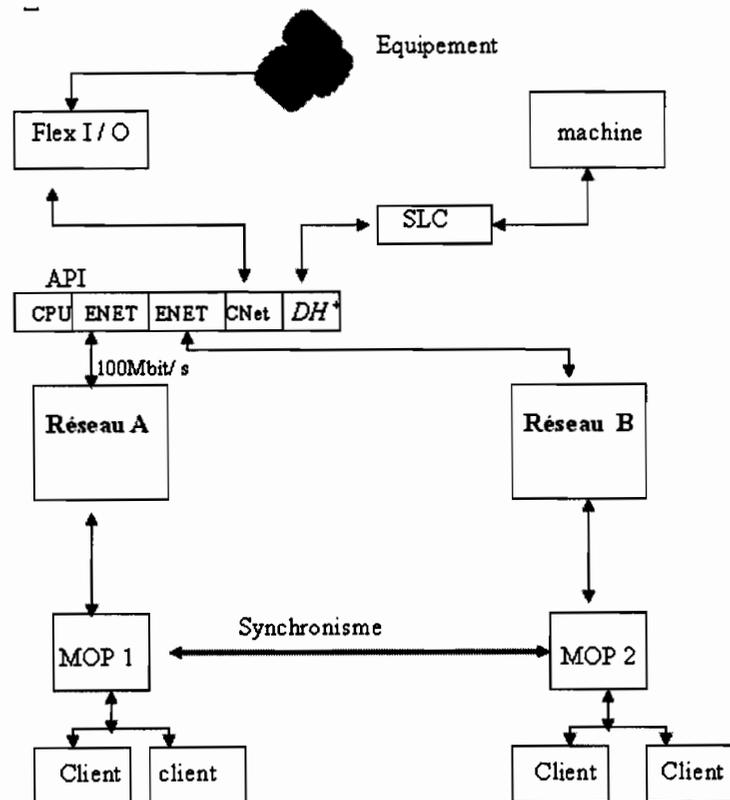


Fig. I.2.2 schéma de principe du processus d'acquisition de données

L'acquisition des données est rendue possible par la connexion des équipements à des automates.

Chaque automate est relié par une transmission de 100 Mbit/s à deux réseaux Ethernet.

Chaque réseau transmet les informations reçues à des serveurs nommés MPO1 ou MPO2.

Les deux systèmes de stockage sont synchronisés pour permettre une sauvegarde réciproque des informations. Les deux réseaux connectés rendent possible le fonctionnement du système de l'automate lorsqu'une des cartes de données est défectueuse ou un serveur.

Des ordinateurs sont connectés à chaque PC serveur.

2.3.1.2 les réseaux de communication

Le réseau Ethernet est un bus de communication permettant le dialogue entre les différents automates et les ordinateurs de supervision.

On nomme automate programmable industriel (API), un dispositif électronique destiné à la commande de processus industriels par un traitement séquentiel. Il envoie des ordres vers les pré actionneurs (partie opérative) à partir de données d'entrée fournies par des capteurs (partie commande), de consigne, et de programme informatique.

Plusieurs API permettent la gestion, le contrôle et la commande de la cimenterie. Ces API sont reliés entre eux et aussi à la station de contrôle commande par un réseau Ethernet par le biais de câbles RJ 45 et de fibre optique.

2.3.1.3. Les réseaux secondaires

Ils sont constitués des sous automates programmables industriels et des entrées sorties déportées.

On en distingue trois types :

2.3.1.3 .1. Le réseau Control Net

Ce réseau permet la communication entre les entrées/sorties du process et les automates à l'aide de modules dénommés FLEX I/O.

2.3.1.3 .2. Le réseau Device Net

C'est un protocole de communication utilisé dans l'industrie pour connecter et administrer à distance une large gamme d'appareils.

Aux Ciments du Sahel, ce réseau est particulièrement utilisé pour la gestion du système d'alimentation du four.

2.3.1.3 .3. Le réseau DH⁺

Il permet la communication entre les automates secondaires et les automates principaux.

2.3.1.4. Les capteurs

Les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisitions de données

Ce sont les éléments placés sur les installations pour collecter les informations locales.

2.3.1.4.1. Apport énergétique

Nous pouvons classer les capteurs en deux groupes selon leur apport énergétique

- Les capteurs passifs :

Ils n'ont pas d'apport d'énergie extérieure pour fonctionner.

- les capteurs actifs :

Ce sont tous les capteurs qui nécessitent une source de tension. Ils sont constitués d'un ou d'un ensemble de transducteurs

2.3.1.4.2. Caractéristique des capteurs

Plusieurs critères peuvent caractériser un capteur donné. Ce sont principalement :

- La grandeur physique observée
- Son étendue de mesure
- Sa précision
- Sa linéarité
- Sa plage de fonctionnement
- le principe physique utilisé par les capteurs :

Les capteurs industriels exploitent plusieurs principes physiques dont les plus courants sont :

- La variation d'inductance
 - La variation de capacité
 - La variation de la résistance
 - La dilatation
- Etc.

2.3.1.4. 3 les types de capteurs

Ils existent plusieurs types de capteurs que nous pouvons classer selon la grandeur physique observée. Il s'agit des capteurs de :

- Lumière
- Son

- Température
- Pression
- Débit
- Courant
- Niveau
- Déplacement
- Contraintes
- Inerties

2.3.2. Exemples de capteurs

Pour assurer une exploitation optimisée d'une maintenance conditionnelle, préventive, certains paramètres sont suivis. Ces paramètres sont :

- Le débit ;
- La température ;
- La pression ;
- Les vibrations ;
- Les consommations spécifiques ;
- Les temps de marche ;
- Les déplacements ;
- Les mouvements ;
- Etc.

2.3.2.1. Capteur de débit

Pour une masse m se déplaçant à une vitesse v , dans un système en rotation ayant lui-même une vitesse angulaire ω , la force de Coriolis vaut $F = 2 \times m \times \omega \times v$. Le débitmètre de Coriolis utilise comme détecteur un tube en U sans obstacle.

Le tube de mesure vibre à sa fréquence naturelle à l'intérieur du boîtier du capteur. Le tube de mesure est actionné par un bobinage électromagnétique situé au centre de la courbure du tube et vibre comme un diapason. Le fluide s'écoule dans le tube de mesure et est contraint de suivre le mouvement vertical du tube vibrant. Lorsque le tube monte pendant une moitié de sa

période vibratoire, le fluide traversant le détecteur résiste à son entraînement vers le haut en repoussant le tube vers le bas.

A la sortie du détecteur, le fluide a un mouvement ascendant, induit par le mouvement du tube. Lorsqu'il franchit le coude du tube, le fluide résiste aux modifications de son mouvement vertical en repoussant le tube vers le haut. La différence de forces entraîne une torsion du tube de mesure. Lorsque le tube descend pendant la seconde moitié de sa période vibratoire, il se tord dans le sens opposé. C'est cette caractéristique de torsion qui est appelé effet Coriolis.

Du fait de la seconde loi de mouvement de Newton, l'amplitude de la torsion du tube de mesure est directement proportionnelle au débit massique du fluide traversant le tube. Les détecteurs électromagnétiques situés de part et d'autre du tube de mesure enregistrent la vitesse du tube vibrant. Le débit massique se détermine en mesurant la différence de temps entre les signaux de détecteurs de vitesse. En effet la torsion du tube de mesure, pendant l'écoulement du fluide, entraîne une différence de temps entre les deux signaux de vitesse. C'est cette différence de temps qui est directement proportionnelle au débit massique traversant le tube et demeure indépendante des propriétés de ce fluide.

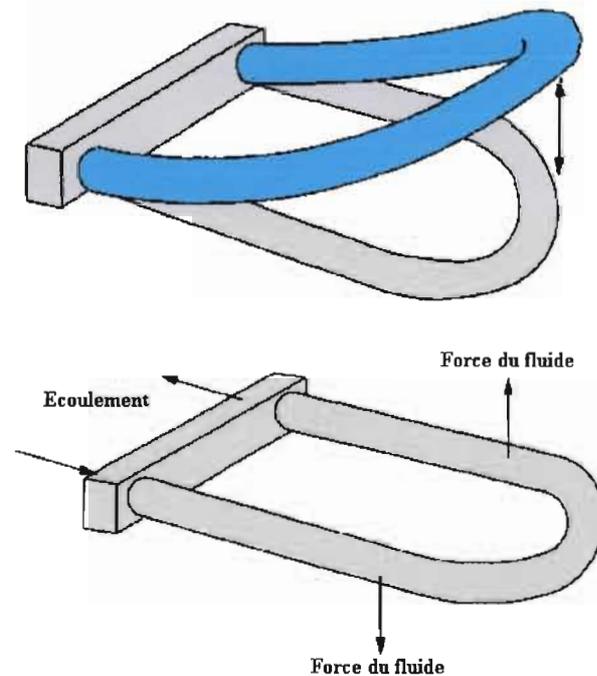


Fig. I.9.principe du débitmètre de Coriolis

2.3.2.2. Capteur de température

Les températures à la tour échangeur constituent une caractéristique de la qualité du clinker et par conséquent de la qualité du ciment.

2.3.2.2.1 Les thermocouples

Ils sont utilisés pour la mesure de température et leurs avantages résident dans le fait qu'ils sont bon marché et qu'ils permettent de mesurer une grande gamme de températures.

Cependant, un défaut de précision constitue leur véritable point faible. En effet, il est très difficile d'obtenir des mesures avec une erreur relative entre 0. 1°C et -0.2°C.

La mesure de la température est basée sur l'effet Seebeck

Le thermocouple est un générateur thermoélectrique constitué de deux conducteurs de natures différentes réunis en un point par une soudure. Il fournit une force électromotrice dont la valeur est fonction de la température du point de jonction. Ce point est appelé soudure chaude ou soudure de mesure. L'autre point de jonction est la soudure froide.

Par effet Seebeck, le thermocouple génère une différence de potentiel qui dépend de la différence de température entre les deux jonctions $T_1 - T_2$.

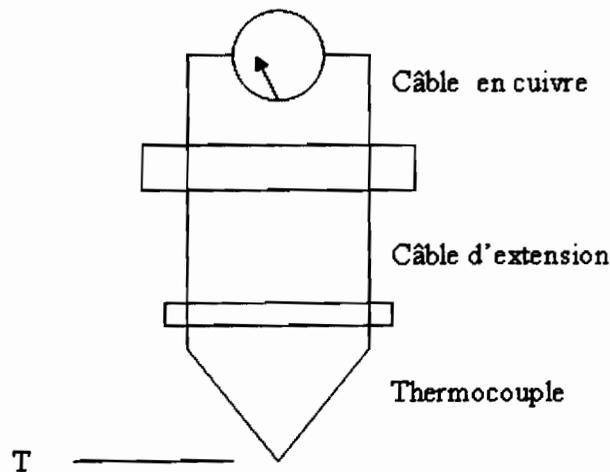


Fig. I .10. : Principe du thermocouple

Les thermocouples mesurent une différence de température et non pas proprement parler une température. Ainsi, pour mesurer la température inconnue c'est-à-dire celle de la soudure chaude, la jonction de la soudure froide doit être maintenue une température connue (température de référence)

Il existe plusieurs types de thermocouples. Tous sont utilisés pour une gamme précise de température de quelques degrés à quelques milliers de degrés. Les signaux électriques de ces sondes sont de l'ordre du microvolt au millivolt et sont non linéaires. Les signaux sont traités par des modules électroniques intégrant une fonction adaptée au thermocouple qui linéarise le signal et le corrige avec la soudure froide.

Ainsi, à partir de points de référence de coordonnées (4mA, 0°C) et (20mA, 1200°C), l'automaticien peut à partir d'une mesure donnée du courant déduire la correspondance thermique.

Les thermocouples peuvent être classés selon les types de métaux qui les constituent. Ils diffèrent ainsi par leur gamme de température, leur précision, et aussi leur type d'isolation.

Nous pouvons citer :

Tableau I.1. : Type Métal 1 Métal 2 Gamme de température

Types	Métal 1	Métal 2	Gamme de température
K	Chromel (Nickel + Chrome)	Alumel (nickel + aluminium)	-200°C à 1200°C
E	Chromel (Nickel + Chrome)	Constantan (cuivre + nickel)	Pour basses températures
N	Nicrisil (Nickel + chrome + silicium)	Nisil (nickel +silicium)	Pour hautes températures
J	Fer	Constantan (cuivre + nickel)	Fonctionnement dans le vide
T	Cuivre	Constantan (cuivre + nickel)	Pour basses températures
R	Platine + Rhodium (13%)	Platine	Pour hautes températures
S	Platine + Rhodium (10%)	Platine	Pour hautes températures
B	Platine + Rhodium (30%)	Platine + Rhodium (6%)	Pour hautes températures

2.3.2.2 Les pyromètres

Ce sont des dispositifs utilisés pour mesurer des températures élevées. Différents principes peuvent être utilisés comme les sondes de température où la résistance est une fonction linéaire de la température, les thermocouples déjà étudiés ci haut où la tension est fonction de la température, mais surtout les pyromètres optiques permettant de mesurer des températures supérieures à 600°C et l'énergie émise est mesurée par infrarouge.

D'après le principe de la thermographie infrarouge, tout corps dont la température est supérieure à 0 degré absolu émet un rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est détecté sous forme de chaleur.

Cette technique permet de mesurer, par l'intermédiaire d'un détecteur ou scanner, la puissance du rayonnement électromagnétique dans le spectre des infrarouges, émis par chaque point d'une scène ou de l'objet observé (cas du four au Ciments du Sahel). Le scanner reçoit le rayonnement, le convertit en signal électrique et reconstitue sur un écran de la salle de contrôle commande une image thermique visible du four. Cette image est le thermogramme.

2.3.2.3. Capteur de pression : Le manomètre à membrane

La pression est une grandeur dérivée du système international. Elle est définie comme le quotient d'une force par une surface. La pression s'exerce perpendiculairement à la surface considérée. Elle est donnée par la relation :

$$P = \frac{F}{S}$$

Le manomètre à membrane est un capteur de pression faisant partie des manomètres à déformation solide

La membrane est tendue entre deux brides. Par un trou dans le raccord, le fluide à mesurer arrive dans la chambre de pression en dessous de la membrane. La membrane se déplace sous l'effet de la pression. Le déplacement de la membrane est proportionnel à la pression mesurée et est transmis par l'intermédiaire du mouvement à l'aiguille et affiché sur le cadran en tant que valeur de pression. Afin d'être protégés contre des détériorations, le système de mesure, le cadran et l'aiguille sont montés dans un boîtier

Les manomètres à membrane sont utilisés principalement pour la mesure de faibles pressions positives ou négatives de fluides gazeux ou liquides. Les étendues de mesure possibles s'étalent sur toutes les plages de 16 mbar à 40 bars. Les membranes de ces manomètres sont

très minces et ondulées. De par leur forme, ils sont moins sensibles aux vibrations que les manomètres à tube et sont plus faciles à protéger contre les surcharges et les fluides agressifs. Les transmetteurs permettent une conversion des grandeurs physiques en signal électrique. Une échelle, un système de codage et une droite de transfert permettent d'avoir un signal numérique de la grandeur physique.

PARTIE II :

PREDICTION DU TAUX D'HUMIDITE **DU CIMENT**

Plusieurs facteurs appuient la nécessité de réaliser des diagnostics énergétiques dans l'industrie cimentière pour identifier des économies d'énergies potentielles et mettre en œuvre des mesures d'économies d'énergie.

Parmi ces facteurs, nous avons la forte consommation en énergie calorifique dans l'industrie cimentière.

Un suivi périodique de l'évolution énergétique est nécessaire.

Pour faire un bilan thermique, il faut les conditions suivantes :

- définir le système
- identifier l'entrée et la sortie du flux de matière
- établir les températures et la teneur en chaleur spécifique de la circulation de matières
- identifier les autres sources d'entrée ou de sortie d'énergie (chaleur de réaction, radiation)
- calculer le flux énergétique

Pour réaliser un bilan thermique sûr, le système étudié doit avoir un rendement relativement constant durant une certaine période, quelques jours par exemple. Les résultats doivent refléter les valeurs moyennes d'une équipe de 8 heures par exemple.

Lorsqu'on établit un bilan thermique, on doit d'abord choisir la température de référence à partir de laquelle la teneur en chaleur doit être calculée.

Dans notre étude au Ciments du Sahel, le bilan thermique de la ligne de cuisson nous servira de base pour l'évaluation de l'impact de la variation de la température et du débit des gaz chauds venant du refroidisseur vers le broyeur ciment.

Chapitre 1 : LE BILAN D'ENERGIE DU BROYAGE

Le bilan d'énergie du broyage du ciment est un outil de prédiction du taux d'humidité du ciment. Pour ce faire, nous allons faire une modélisation du broyage de ciment. Cette dernière est une conception d'un modèle. Elle permet, à partir de l'application d'une ou plusieurs théories à un niveau d'approximation donné de décrire et de prévoir l'évolution d'un système.

1.1 Mouvements d'énergie

Les mouvements sont constitués des entrées et des sorties d'énergie.

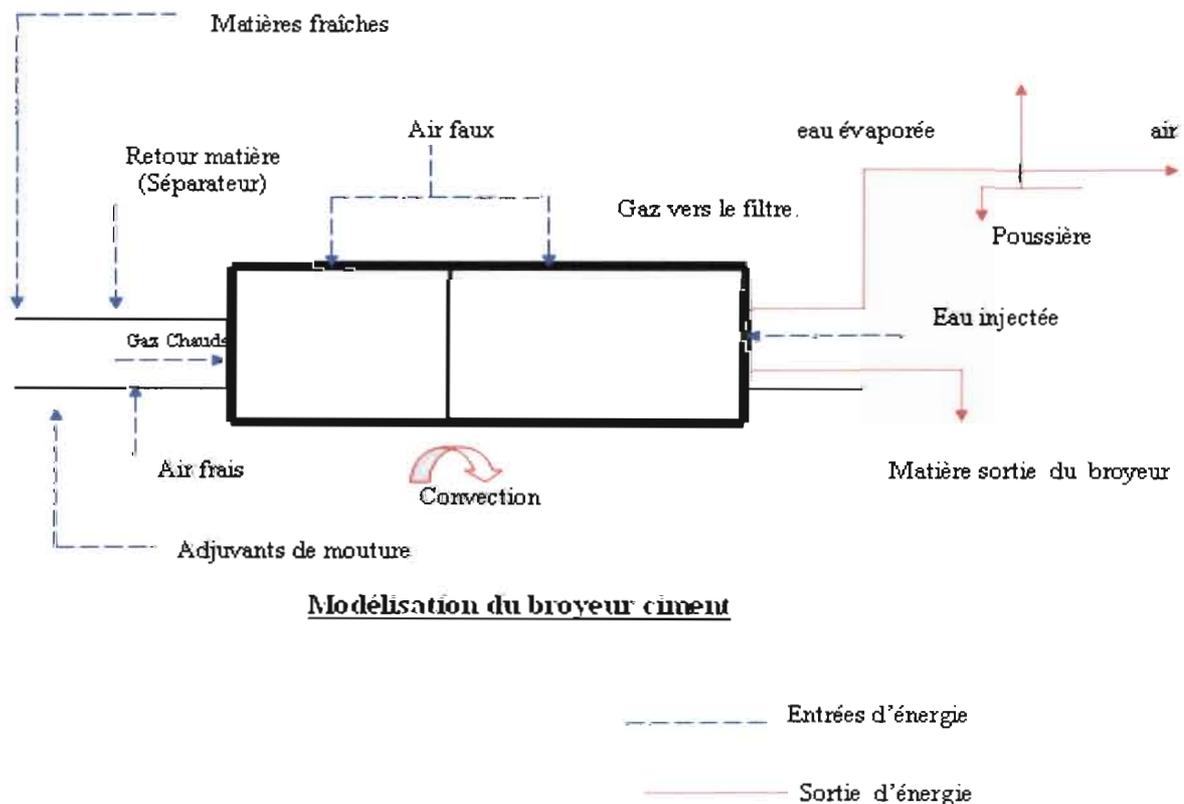


Fig. II. 1. : Mouvement d'énergie du broyeur ciment

1.1.1. Les entrées d'énergie

1.1.1.1. La matière fraîche

Il s'agit du clinker, des ajouts, des produits secs et de l'eau contenus dans ces matériaux

1.1.1.2. Les gaz chauds

Ce sont des gaz provenant du refroidisseur à clinker

1.1.1.3. Le retour matière

Il provient du séparateur

1.1.1.4. Les airs faux

Les airs faux sont des airs parasites provenant des joints du système

1.1.1.5. L'apport des boulets

Il s'agit de l'apport thermique des boulets lors du processus de broyage.

1.1.1.6. L'air frais

Il est utilisé pour le refroidissement à l'entrée du broyeur

1.1.1.7. L'eau injectée

C'est de l'eau injectée pour le refroidissement du ciment à la sortie du broyeur.

1.1.1.8. Les adjuvants

Ce sont des composants chimiques qui facilitent la broyabilité des matières entrées broyeur.

1.1.2. Les sorties d'énergie

1.1.2.1. La matière sortie broyeur

Elle est constituée du ciment sortie broyeur et de l'humidité contenue dans le ciment. Elle est appelée la charge circulante.

1.1.2.2. La convection

C'est un transfert d'énergie du système à la surface du broyeur

1.1.2.3 Les gaz vers le filtre

Il s'agit de la poussière, de l'air et de la vapeur d'eau provenant de l'évaporation de l'eau lors du broyage

1.2. Les équations du bilan

Pour la modélisation du système, nous considérerons les notations suivantes :

E_1 : entrée d'énergie avec matière fraîche

E_2 : entrée d'énergie avec gaz chaud

E_3 : entrée d'énergie avec l'air frais

E_4 : entrée d'énergie avec la matière provenant du séparateur

E_5 : entrée d'énergie avec l'air faux

E_6 : entrée d'énergie avec l'eau injectée

S_1 : sortie d'énergie avec la matière provenant du broyeur

S_2 : sortie d'énergie provenant de la convection

Eau évaporée

S_3 : sortie d'énergie des gaz vers le filtre

poussière

Air

Vapeur d'eau

1.2.1 Les entrées d'énergie

1.2.1.1 Énergie liée à la matière fraîche

Elle est utilisée pour l'alimentation du broyeur ciment. Elle est constituée de :

α % de clinker

β % de calcaire

γ % de gypse

Le débit humide de chaque composant est relevé au niveau de la salle de commande en continu en tonne/ heure (t/h)

La température et l'humidité sont obtenues par prélèvement direct sur les alimentateurs, les valeurs sont déterminées au laboratoire.

▪ Calcul du débit de la matière fraîche

Considérons :

$Q_{E_{ck}}$: le débit massique humide du clinker en t/h

$Q_{E_{ca}}$: le débit massique humide du calcaire en t/h

$Q_{E_{gy}}$: Le débit massique humide du gypse en t/h

$Q_{E_{H_{ck}}}$: le débit massique de l'humidité dans le clinker en t/h

$Q_{E_{H_{ca}}}$: le débit massique de l'humidité dans le calcaire en t/h

$Q_{E_{H_{gy}}}$: le débit massique de l'humidité dans le gypse en t/h

$Q_{E_1 S_{ck}}$: le débit massique sec du clinker en t/h

$Q_{E_1 S_{ca}}$: le débit massique sec du calcaire en t/h

$Q_{E_1 S_{gy}}$: le débit massique sec du gypse en t/h

$h_{E_{1ck}}$: le taux d'humidité du clinker en pourcentage

$h_{E_{1ca}}$: le taux d'humidité du calcaire en pourcentage

$h_{E_{1gy}}$: le taux d'humidité du gypse en pourcentage

Le débit massique de l'humidité dans la matière fraîche est :

$$Q_{E_1 H_{ck}} = \frac{h_{E_1 ck} \times Q_{E_1 ck}}{100} \quad \text{pour le clinker} \quad (1)$$

$$Q_{E_1 H_{ca}} = \frac{h_{E_1 ca} \times Q_{E_1 ca}}{100} \quad \text{pour le calcaire} \quad (2)$$

$$Q_{E_1 H_{gy}} = \frac{h_{E_1 gy} \times Q_{E_1 gy}}{100} \quad \text{pour le gypse} \quad (3)$$

Avec les résultats précédents nous pouvons calculer le débit massique sec de chaque composant du mélange.

Le débit massique sec de chaque composant du système est :

$$Q_{E_1 S_{ck}} = Q_{E_1 ck} - Q_{E_1 H_{ck}} = \frac{Q_{E_1 ck} \times (100 - h_{E_1 ck})}{100} \quad \text{pour le clinker} \quad (4)$$

$$Q_{E_1 S_{ca}} = Q_{E_1 ca} - Q_{E_1 H_{ca}} = \frac{Q_{E_1 ca} \times (100 - h_{E_1 ca})}{100} \quad \text{pour le calcaire} \quad (5)$$

$$Q_{E_1 S_{gy}} = Q_{E_1 gy} - Q_{E_1 H_{gy}} = \frac{Q_{E_1 gy} \times (100 - h_{E_1 gy})}{100} \quad \text{pour le gypse} \quad (6)$$

▪ Calcul de l'énergie de la matière fraîche

Nous considérons les débits massiques secs de chaque composant du mélange.

Soient :

$H_{E_{1Ck}}$: l'énergie du clinker en Mcal/h

$H_{E_{1Ca}}$: l'énergie du calcaire en Mcal/h

$H_{E_{1gy}}$: l'énergie du gypse en Mcal/h

$H_{E_{1S}}$: l'énergie du mélange sec en Mcal/h

$C_{P_{Ck}}$: chaleur massique du clinker en fonction de la température en kcal /kg/°C

$C_{P_{Ca}}$: chaleur massique du calcaire en fonction de la température en kcal /kg/°C

$C_{P_{gy}}$: chaleur massique du gypse en fonction de la température en kcal/kg/°C

ΔT_{Ck} : variation de la température du clinker en °C

ΔT_{Ca} : variation de la température du calcaire en °C

ΔT_{gy} : variation de la température du gypse en °C

Pour le clinker avec l'équation (4) on a :

$$H_{E_{1Ck}} = Q_{E_{1S_{Ck}}} \times C_{P_{Ck}} \times \Delta T_{Ck} \quad (7)$$

Pour le calcaire avec l'équation (5) on a

$$H_{E_{1Ca}} = Q_{E_{1S_{Ca}}} \times C_{P_{Ca}} \times \Delta T_{Ca} \quad (8)$$

Pour le gypse avec l'équation (6) on a

$$H_{E_{1gy}} = Q_{E_{1S_{gy}}} \times C_{P_{gy}} \times \Delta T_{gy} \quad (9)$$

Etant donné qu'il n'y a pas de réactions chimiques dans le mélange sec, l'énergie du mélange est :

$$H_{E_{1S}} = H_{E_{1Ck}} + H_{E_{1Ca}} + H_{E_{1gy}} \quad (10)$$

$$H_{E_{1S}} = Q_{E_{1S_{Ck}}} \times C_{P_{Ck}} \times \Delta T_{Ck} + Q_{E_{1Ca}} \times C_{P_{Ca}} \times \Delta T_{Ca} + Q_{E_{1gy}} \times C_{P_{gy}} \times \Delta T_{gy}$$

$$H_{E_{1S}} = \frac{(100 - h_{E_{1Ck}})}{100} \times Q_{E_{1Ck}} \times C_{P_{Ck}} \times \Delta T_{Ck} + \frac{(100 - h_{E_{1Ca}})}{100} \times Q_{E_{1Ca}} \times \Delta T_{Ca} + \frac{(100 - h_{E_{1gy}})}{100} \times Q_{E_{1gy}} \times C_{P_{gy}} \times \Delta T_{gy}$$

1.2.1.2. Énergie liée au retour matière

- **Calcul du débit de retour matière**

Le débit du retour matière est une donnée disponible au niveau de la salle de commande en continu.

On peut à la suite de test au laboratoire savoir le taux d'humidité du retour matière.

Soient

$Q_{E_{4R}}$: le débit massique humide du le retour matière en t/h

$Q_{E_{4HR}}$: le débit massique d'eau dans le retour matière en t/h

$Q_{E_{4SR}}$: le débit massique sec de retour matière en t/h

$h_{E_{4R}}$: le taux d'humidité du retour matière en pourcentage

$$Q_{E_{4HR}} = \frac{Q_{E_{4R}} \times h_{E_{4R}}}{100} \quad (11)$$

$$Q_{E_{4SR}} = Q_{E_{4R}} - Q_{E_{4HR}} = \frac{Q_{E_{4R}} \times (100 - h_{E_{4R}})}{100} \quad (12)$$

- **Calcul de l'énergie liée au retour matière sèche :**

Soient :

$H_{E_{1SR}}$: l'énergie liée au retour matière sèche en Mcal/h

C_{PRS} : chaleur massique du retour matière en kcal/kg/°C en fonction de la température

$$C_{PRS} = C_{p..ciment}$$

ΔT_{RS} : variation de la température du retour matière en °C

$$H_{E_4SR} = Q_{E_4SR} \times C_{P_{RS}} \times \Delta T_{RS} = \frac{(100 - h_{E_4R})}{100} \times Q_{E_4R} \times \Delta T_{RS} \quad (13)$$

Nous prendrons la chaleur massique du ciment pour la valeur de la chaleur massique du retour matière.

1.2.1.3. Énergie du mélange gaz chauds et air frais

- Détermination du débit massique des gaz chauds Q_{E_2g}

Le débit des gaz chauds est calculé à partir des courbes caractéristiques du ventilateur 541FN310 voir en **annexe 5**.

Soient :

Q_{Vg} : débit volumique de l'excès d'air en m^3/s obtenu à partir des caractéristiques du ventilateur de tirage.

Q_{E_2g} : le débit massique des gaz chauds à l'entrée du broyeur en t/h

n : vitesse du ventilateur en rpm

N : puissance du ventilateur en W

η : rendement = 0,85

ρ_g : densité du gaz propre en kg/m^3 à la température de l'air

P_t : pression totale du gaz propre en Pa

X_{ref} : valeur de référence sur la courbe du ventilateur

$$Q_{Vg} = N \times \frac{1}{n^2} \times \eta \times \frac{1}{\rho} \times \frac{n_{ref}^2 \times \rho_{ref}}{P_{t,ref}} \quad (14)$$

$$Q_{E_2g} = \rho_g \times Q_{Vg} = 3,6 \times N \times \frac{1}{n^2} \times \eta \times \frac{n_{ref}^2 \times \rho_{ref}}{P_{t,ref}} \quad (15)$$

La vitesse du courant d'air frais est mesurée à l'aide d'un anémomètre. C'est une mesure directe.

- **Détermination du débit massique d'air frais**

Avec la section de la conduite, le débit massique de l'air frais se calcule à partir du débit volumique.

Soient :

Q_{E_3A} : le débit massique de l'air frais à l'entrée du broyeur en t/h

V_a : la vitesse de l'air frais à l'entrée du broyeur en m/h

S : la section de la conduite d'air frais en m^2

Q_v : Le débit volumique en m^3/h

d : diamètre de la conduite d'air frais

ρ_A : la masse volumique de l'air frais en t/m^3

ρ_0 : la masse volumique de l'air à la température de référence en t/m^3

ΔT_{af} : la variation de la température de l'air frais en $^{\circ}C$

$$Q_{va} = S \times V_a \quad (16)$$

$$S = \pi \times \frac{d^2}{4} \quad (17)$$

$$Q_{E_3A} = \rho_A \times Q_v \quad (18)$$

$$\rho_A = \rho_0 \times \frac{273}{T_{af} + 273} \quad (19)$$

Nous négligerons l'humidité de l'air frais qui est donc essentiellement de l'air sec à cause du débit important des gaz chauds avec lesquels cet air frais est mélangé

- **Calcul de l'énergie du mélange gaz chauds et air frais**

La température du mélange air frais et gaz est relevée à la supervision.

Soient :

H_{EAG} : l'énergie liée au mélange air frais et gaz chauds en Mcal/h

Q_{AG} : le débit massique du mélange air frais et gaz chauds en t/h

C_{PAG} : chaleur massique du mélange air frais et gaz chauds en $\text{kcal.kg}^{-1} . ^\circ\text{C}^{-1}$

ΔT_{AG} : variation de la température du mélange air frais et gaz chauds en $^\circ\text{C}$

T_G : température des gaz chauds en $^\circ\text{C}$

$$H_{EAG} = Q_{AG} \times C_{PAG} \times \Delta T_{AG} \quad (20)$$

$$\text{or } Q_{AG} = Q_{E_2g} + Q_{E_3A} \quad (21)$$

$$H_{EAG} = (Q_{E_2g} + Q_{E_3A}) \times C_{PAG} \times \Delta T_{AG} \quad (22)$$

1.2.1.4. Énergie liée aux airs faux

C'est un paramètre qui intervient dans le bilan d'énergie mais qui est difficile à contrôler. Ils proviennent de l'ouverture des joints.

1.2.1.5. Énergie de l'eau dans le broyeur

▪ détermination du débit massique d'eau dans le broyeur

L'apport d'eau dans le broyeur est composé :

- du débit massique d'eau dans la matière fraîche en t/h
- du débit massique d'eau dans le retour matière en t/h
- du débit massique d'eau injectée pour le refroidissement du ciment en t/h

Soient

$H_{E, HCK}$: énergie de l'humidité du clinker contenu dans la matière fraîche en Mcal/h

$H_{E, HCa}$: énergie de l'humidité du calcaire contenu dans la matière fraîche en kcal/h

$H_{E, Hgy}$: énergie de l'humidité du gypse contenu dans la matière fraîche en kcal/h l'humidité

H_{E4HR} : énergie de l'humidité dans le retour matière en Mcal/h

H_{E6Hei} : énergie de l'eau injectée dans le broyeur pour le refroidissement du ciment en

Mcal/kg/K

H_{E1H} : énergie du mélange d'eau en Mcal/kg/h

Q_e : débit massique d'eau injectée dans tout le système t/h

Q_{ei} : débit massique d'eau injectée dans le broyeur en t/h

Q_{eCk} : débit massique d'humidité contenu dans le clinker de la matière fraîche t/h

Q_{eca} : débit massique d'humidité contenu dans le calcaire de la matière fraîche en t/h

Q_{egy} : débit massique d'humidité contenu dans le gypse de la matière fraîche en t/h

C_{Pei} : chaleur massique de l'eau liquide injectée dans le broyeur pour le refroidissement du ciment en kcal/kg/°C

C_{PeCk} : chaleur massique de l'humidité contenu dans le clinker de la matière fraîche en kcal/kg/°C

C_{PeCa} : chaleur massique de l'humidité contenu dans le calcaire de la matière fraîche en kcal/kg/°C

C_{PeGy} : chaleur massique de l'humidité contenu dans le clinker de la matière fraîche en kcal/kg/°C

$C_{Pei} = C_{PeCk} = C_{PeCa} = C_{PeGy} = C_{Peau} = 1 \text{ kcal / kg / } ^\circ\text{C}$ l'eau est à l'état liquide.

ΔT_{ei} : variation de la température de l'eau injectée pour le refroidissement du ciment en °C

ΔT_{eCk} : variation de la température de l'humidité contenue dans le clinker de la matière fraîche °C

ΔT_{eCa} : variation de la température de l'eau injectée contenue dans le calcaire de la matière fraîche en °C

ΔT_{eGy} : variation de la température de l'humidité contenue dans le gypse de la matière fraîche en °C

ΔT_{sr} : variation de la température de l'humidité dans le retour matière en °C

• Calcul de l'énergie liée à l'eau injectée dans le broyeur

$$H_{E_1 H} = H_{E_{4HR}} + H_{E_6 H_{ei}} + \sum H_{E_1 H_i} \quad \text{avec } i=ei, c, ca, gy$$

$$H_{E_{1H}} = H_{E_{6Hei}} + H_{E_{1HCk}} + H_{E_{1HCa}} + H_{E_{1Hgy}} + H_{E_{4HR}}$$

Où

$$H_{E_{6Hei}} = Q_{ei} \times C_{Pei} \times \Delta T_{ei} \quad (23)$$

$$H_{E_{1HC}} = Q_{eCk} \times C_{PeCk} \times \Delta T_{eCk} = \frac{h_{E_{1Ck}}}{100} \times Q_{E_{1Ck}} \times C_{PeCk} \times \Delta T_{eCk} \quad (24)$$

$$H_{E_{1HCa}} = Q_{eCa} \times C_{PeCa} \times \Delta T_{eCa} = \frac{h_{E_{1Ca}}}{100} \times Q_{E_{1Ca}} \times C_{PeCa} \times \Delta T_{eCa} \quad (25)$$

$$H_{E_{1Hgy}} = Q_{egy} \times C_{Pegy} \times \Delta T_{egy} = \frac{h_{E_{1gy}}}{100} \times Q_{E_{1gy}} \times C_{Pegy} \times \Delta T_{egy} \quad (26)$$

$$H_{E_{1H}} = Q_{ei} \times C_{Pei} \times \Delta T_{ei} + Q_{eCk} \times C_{PeCk} \times \Delta T_{eCk} + Q_{eCa} \times C_{PeCa} \times \Delta T_{eCa} + Q_{egy} \times C_{Pegy} \times \Delta T_{egy} + \frac{h_{E_{4R}}}{100} \times Q_{E_{4R}} \times C_{P_{Cl}} \times \Delta T_{SR}$$

$$H_{E_{1H}} = Q_{ei} \times C_{Pei} \times \Delta T_{ei} + \frac{h_{E_{1Ck}}}{100} \times Q_{E_{1Ck}} \times C_{PeCk} \times \Delta T_{eCk} + \frac{h_{E_{1Ca}}}{100} \times Q_{E_{1Ca}} \times C_{PeCa} \times \Delta T_{eCa} + \frac{h_{E_{1gy}}}{100} \times Q_{E_{1gy}} \times C_{Pegy} \times \Delta T_{egy} + \frac{h_{E_{4R}}}{100} \times Q_{E_{4R}} \times C_{P_{Cl}} \times \Delta T_{SR} \quad (27)$$

1.2.1.6. Énergie liée à l'apport des adjuvants

Le débit volumique des adjuvants est une donnée fournie par le laboratoire en ml/min.

Soient :

H_{Ad} : L'énergie liée à l'apport de l'adjuvant en Mcal/h

$C_{P_{Ad}}$: La chaleur massique de l'adjuvant en kcal/kg/°C

ρ_{Ad} : La masse volumique de l'adjuvant en kg/m³

ΔT_{Ad} : La variation de la température de l'adjuvant en °C

$$H_{Ad} = C \times \rho_{Ad} \times Q_{V Ad} \times C_{P Ad} \times \Delta T_{Ad} \quad (28)$$

avec $C = 60.10^{-9}$

$$H_{Ad} = 60.10^{-9} \times \rho_{Ad} \times Q_{V Ad} \times C_{P Ad} \times \Delta T_{Ad} \quad (29)$$

1.2.1.7. Énergie liée aux boulets du broyeur

La rotation du broyeur engendre un échange de chaleur à cause des chocs entre les boulets et la matière.

L'apport d'énergie des boulets constitue 95% de la puissance du moteur selon le fabricant.

Soient :

$H_{E, B}$: l'énergie des boulets en Mcal/h

P : la puissance du moteur du broyeur en kW

L'apport d'énergie des boulets est :

$$H_{E, B} = 0.95 \times C \times P \quad (30)$$

or 1kwh=860 kcal c'est à dire 1kw=860kcal/h

donc 1kw/h = 0.86 Mcal/h=C

Ainsi

$$H_{E, B} = 0.86 \times 0.95 \times P \quad (31)$$

1.2.2 Les sorties d'énergie

1.2.2.1 Énergie de la matière sèche sortie broyeur

Le débit massique humide à la sortie du broyeur est une donnée relevée à la salle de commande en continu : c'est la charge circulante.

Soient :

$H_{S, m}$: Énergie de la matière sèche à la sortie du broyeur en Mcal/h

$H_{S_1 S_m}$: énergie de la matière sèche sortie broyeur en Mcal/h

$H_{S_1 em}$: énergie de l'eau à la sortie du broyeur en Mcal/h

$Q_{S_1 m}$: débit massique humide de matière sortie broyeur en t/h

$Q_{S_1 S_m}$: débit massique sec de matière sortie du broyeur en t/h

$Q_{S_1 em}$: débit massique de l'humidité contenu dans la matière sortie broyeur en t/h

$C_{P S_m}$: chaleur massique de matière à la sortie broyeur en fonction de la température en kcal/kg/°C

Cette chaleur est celle du ciment.

$C_{P em}$: Chaleur massique de l'humidité contenue dans la matière sortie broyeur en fonction de la température en kcal/kg/°C ($C_{P em} = C_{P eau}$)

ΔT_{S_m} : variation de la température de la matière sèche sortie broyeur en °C

$\Delta T_{S_1 S_m}$: variation de la température de la matière sèche sortie broyeur en °C

ΔT_{em} : variation de la température de l'humidité contenue dans la matière sortie broyeur en °C

x_0 : taux d'humidité du ciment en pourcentage : c'est le paramètre recherché.

• Détermination du débit massique de matière sèche sortie broyeur

$$Q_{S_1 S_m} = Q_{S_1 m} - Q_{S_1 em} \quad (32)$$

$$Q_{S_1 em} = \frac{Q_{S_1 m} \times x_0}{100} \quad (33)$$

$$Q_{S_1 S_m} = \frac{(100 - x_0)}{100} \times Q_{S_1 m} \quad (34)$$

• Calcul de l'énergie liée à la matière sèche sortie broyeur

$$H_{S_1 S_m} = Q_{S_1 S_m} \times C_{P S_m} \times \Delta T_{S_m} = \frac{(100 - x_0)}{100} \times Q_{S_1 m} \times C_{P S_m} \times \Delta T_{S_m} \quad (35)$$

• **Calcul de l'énergie liée à l'humidité sortie broyeur**

$$H_{S_{i\ em}} = Q_{S_{i\ em}} \times C_{P\ em} \times \Delta T_{em} = \frac{x_0}{100} \times Q_{S_{i\ m}} \times C_{P\ em} \times \Delta T_{em} \quad (36)$$

$C_{P\ em}$ est celle de l'eau liquide

1.2.2.2. Energie des gaz vers le filtre

Le gaz vers le filtre est composé de vapeur, d'air et de poussière.

Soient :

$H_{S_2\ G}$: Énergie des gaz vers le filtre en Mcal/h

$H_{S_2\ P}$: énergie de la poussière en Mcal/h

$H_{S_2\ V}$: énergie de vapeur en Mcal/h

$H_{S_2\ A}$: énergie de l'air en Mcal/h

L : chaleur latente en kcal/kg

$Q_{S_2\ V}$: débit massique de la vapeur en t/h

$Q_{S_2\ P}$: débit massique de poussière en t/h

$Q_{S_2\ A}$: débit massique de l'air en t/h

$Q_{S_2\ ev}$: débit massique de l'eau évaporée en t/h

$C_{P\ air}$: chaleur massique de l'air en kcal/kg/°C

$C_{P\ p}$: chaleur massique de la poussière en kcal/kg/°C ($C_{P\ p} = C_{P\ ciment}$)

$C_{P\ ev}$: chaleur massique de l'eau évaporée en fonction de la température en kcal/kg/°C

ΔT_{air} : variation de la température de l'air en °C

ΔT_p : variation de la température de la poussière en °C

▪ **Calcul de l'énergie de vapeur**

L'énergie de vapeur est l'énergie de l'eau évaporée. Elle a subi donc un changement d'état (de l'état liquide à l'état gazeux), ce qui a générée une chaleur latente.

On a :

$$H_{S_2V} = Q_{S_2ev} \times (L + C_{P_{ev}} \times \Delta T_{ev}) \quad (37)$$

Conservation de débit massique d'eau :

$$Q_{E_1H_{ck}} + Q_{E_1H_{ca}} + Q_{E_1H_{gy}} + Q_{E_4HR} + Q_{ei} = Q_{S_2ev} + Q_{S_1em}$$

$$Q_{S_2ev} = Q_{E_1H_{ck}} + Q_{E_1H_{ca}} + Q_{E_1H_{gy}} + Q_{E_4HR} + Q_{ei} - Q_{S_1em}$$

$$Q_{S_2ev} = \frac{h_{E_1Ck} \times Q_{E_1Ck}}{100} + \frac{h_{E_1Ca} \times Q_{E_1Ca}}{100} + \frac{h_{E_1gy} \times Q_{E_1gy}}{100} + \frac{Q_{E_4R} \times h_{E_4R}}{100} + Q_{ei} - \frac{Q_{S_1m} \times x_0}{100} \quad (38)$$

▪ **Calcul de l'énergie des poussières**

L'énergie des poussières est :

$$H_{S_2P} = Q_{S_2P} \times C_{PP} \times \Delta T_P \quad (39)$$

Le débit massique de poussière retenu par le filtre est déterminé à partir de ratio donné par le fabricant du broyeur.

Dans du broyage de ciment au niveau des C.D.S, ce ratio est de 17 t/h pour une charge circulante de 312 t/h.

$$H_{S_2P} = \frac{17}{312} \times Q_{S_2AL} \times C_{PP} \times \Delta T_P \quad (40)$$

▪ **Calcul de l'énergie de l'air**

L'énergie de l'air est :

$$H_{S_2A} = Q_{S_2A} \times C_{P_{air}} \times \Delta T_{air} \quad (41)$$

Avec $Q_{S_2A} = Q_{E_2g} + Q_{E_3A} = Q_{AG}$: la somme des débits massiques des gaz et de l'air à l'entrée connue avec l'équation (21)

▪ **Calcul l'énergie liée aux gaz vers le filtre**

$$H_{S_2G} = H_{S_2V} + H_{S_2P} + H_{S_2A}$$

$$H_{S_2G} = Q_{S_2ev} \times (L + C_{P_{ev}} \times \Delta T_{ev}) + \frac{17}{312} \times Q_{S_2AL} \times C_{PP} \times \Delta T_p + (Q_{E_2g} + Q_{E_3A}) \times C_{P_{air}} \times \Delta T_{air} \quad (42)$$

1.2.2.3. Convection

A la suite d'étude expérimentale, le fabricant FLSmidth a proposé des formule de calcul pour la convection.

▪ **Calcul de l'énergie liée à la convection naturelle**

$$H_{S_3cn} = 10^{-3} \times 80.33 \times \left(\frac{T + T_o}{2} \right)^{-0,724} \times (T - T_o)^{1,333} \times A. \quad (43)$$

H_{S_3cn} : L'énergie par convection naturelle en Mcal/h de clinker

▪ **Calcul de l'énergie liée à la convection forcée**

Pour une vitesse d'air inférieur à 3 m/s

$$H_{S_3cf} = 10^{-3} \times 28.03 \times \left(\frac{T + T_o}{2} \right)^{-0,351} \times V^{0,805} \times D^{-0,195} \times (T - T_o) \times A. \quad (44)$$

H_{S_3cf} : L'énergie par convection forcée en Mcal/h de clinker

Avec :

T : température de surface du broyeur en K

T_o : température ambiant en K

V : vitesse de l'air en m/s

A : surface de contact en m^2

D : diamètre du corps et pour les surfaces planes $D_{\text{fictif}} = \frac{L+1}{2}$ en mètre

Chapitre II : DEDUCTION DU TAUX D'HUMIDITE DU CIMENT

2.1. Calcul du taux d'humidité :

Le principe de conservation d'énergie nous permet d'écrire:

$$H_{E_1S} + H_{E_4SR} + H_{EAG} + H_{E_1H} + H_{Ad} + H_{E_1B} = H_{S_1Sm} + H_{S_1em} + H_{S_2G} + H_{S_3con} \quad (45)$$

En utilisant les équations (10), (13), (22), (27), (29), (30), (35), (36), (38), (42) et (43) nous avons :

$$H_{S_2G} = \left(\frac{h_{E_1Ck}}{100} \times Q_{E_1Ck} + \frac{h_{E_1Ca}}{100} \times Q_{E_1Ca} + \frac{h_{E_1gy}}{100} \times Q_{gy} + \frac{h_{E_4R}}{100} \times Q_{E_4R} + Q_{ei} - \frac{x_0}{100} \times Q_{S_1m} \right) \times (L + C_{P_{ev}} \times \Delta T_{ev}) + \frac{17}{312} \times Q_{S_2AL} \times C_{PP} \times \Delta T_P + (Q_{E_2g} + Q_{E_3A}) \times C_{P_{air}} \times \Delta T_{air} \quad (46)$$

Posons :

$$SE = H_{E_1S} + H_{E_4SR} + H_{EAG} + H_{Ad} + H_{E_1H} + H_{E_1B} \quad (47)$$

$$x_0 \left(\frac{Q_{S_1m}}{100} \times C_{P_{em}} \times \Delta T_{em} - \frac{Q_{S_1m}}{100} \times (L + C_{P_{ev}} \times \Delta T_{ev}) - \frac{Q_{S_1m}}{100} \times C_{P_{Sm}} \times \Delta T_{Sm} \right) = SE - Q_{S_1m} \times C_{P_{Sm}} \times \Delta T_{Sm} - \left(\frac{h_{E_1Ck}}{100} \times Q_{E_1Ck} + \frac{h_{E_1Ca}}{100} \times Q_{E_1Ca} + \frac{h_{E_1gy}}{100} \times Q_{gy} + \frac{h_{E_4R}}{100} \times Q_{E_4R} + Q_{ei} \right) \times (L + C_{P_{ev}} \times \Delta T_{ev}) - H_{S_3con} - \frac{17}{312} \times Q_{S_2AL} \times C_{PP} \times \Delta T_P - (Q_{E_2g} + Q_{E_3A}) \times \Delta T_{air}$$

$$\text{En posant } T = \frac{17}{312} \times Q_{S_2AL} \times C_{PP} \times \Delta T_P + (Q_{E_2g} + Q_{E_3A}) \times C_{P_{air}} \times \Delta T_{air} + H_{S_3conv} \quad (48)$$

d'où

$$x_0 = \frac{SE - Q_{S_1m} \times C_{P_{Sm}} \times \Delta T_{Sm} - \left(\frac{h_{E_1Ck}}{100} \times Q_{E_1Ck} + \frac{h_{E_1Ca}}{100} \times Q_{E_1Ca} + \frac{h_{E_1gy}}{100} \times Q_{E_1gy} + \frac{h_{E_4R}}{100} \times Q_{E_4R} + Q_{ei} \right) \times (L + C_{P_{ev}} \times \Delta T_{ev}) - T}{\frac{Q_{S_1m}}{100} \times C_{P_{em}} \times \Delta T_{em} - \frac{Q_{S_1m}}{100} \times C_{P_{Sm}} \times \Delta T_{Sm} - \frac{L + C_{P_{ev}} \times \Delta T_{ev}}{100} \times Q_{S_1m}}$$

avec $H_{S_1m} = Q_{S_1m} \times C_{P_{Sm}} \times \Delta T_{Sm}$

$$x_0 = \frac{SE - H_{S_1m} - \left(\frac{h_{E_1Ck}}{100} \times Q_{E_1Ck} + \frac{h_{E_1Ca}}{100} \times Q_{E_1Ca} + \frac{h_{E_1gy}}{100} \times Q_{E_1gy} + \frac{h_{E_4R}}{100} \times Q_{E_4R} + Q_{ei} \right) \times (L + C_{P_{ev}} \times \Delta T_{ev}) - T}{\frac{Q_{S_1m}}{100} \times (C_{P_{em}} \times \Delta T_{em} - C_{P_{Sm}} \times \Delta T_{Sm} - L - C_{P_{ev}} \times \Delta T_{ev})} \quad (49)$$

c'est-à-dire

$$x_0 = 100 \times \frac{SE - H_{S_1m} - \left(\sum_j \frac{h_j}{100} \times Q_j + Q_{ei} \right) \times (L + C_{P_{ev}} \times \Delta T_{ev}) - T}{Q_{S_1m} \times (C_{P_{eau}} \times \Delta T_{sm} - C_{P_{ciment}} \times \Delta T_{Sm} - L - C_{P_{ev}} \times \Delta T_{ev})} \quad (50)$$

avec $j = E_{1Ck} ; E_{1Ca} ; E_{1gy} ; E_{4R}$

or $\Delta T_{em} = \Delta T_{Sm} ; C_{P_{em}} = C_{P_{eau}} ; C_{P_{Sm}} = C_{P_{ciment}}$

2.2. Corrélation de l'équation du taux d'humidité avec celle trouvée au laboratoire

Après avoir établi l'équation théorique du taux d'humidité, une phase pratique s'en suit.

Cette étape consiste à prendre des données sur le site avec des appareils de mesure (**annexe 7**) pendant des périodes déterminées et en coordination avec la supervision et le laboratoire pour prédire le taux d'humidité du ciment.

Pour ce faire, dans un premier temps, nous avons effectué 6 séries de mesures sans prendre en compte l'injection d'eau et les gaz chauds du ventilateur 541FN310 c'est-à-dire lorsque le four est à l'arrêt.

En deuxième lieu, nous effectués 3 autres mesures incluant l'effet des gaz chauds et de l'injection d'eau.

Après avoir obtenu des valeurs du taux humidité à laide de l'équation du bilan thermique du broyeur, nous avons fait une corrélation avec les résultats obtenus au niveau du laboratoire.

Nous allons faire 4 corrélations pour en choisir le meilleur. Le coefficient de corrélation mesurant la force de la liaison entre les deux variables nous permet de faire le choix entre les corrélations. Ce coefficient r est compris entre 0 et 1.

Soient X: la valeur du taux d'humidité calculée

Y: la valeur du taux d'humidité obtenu au laboratoire

N : le nombre de tests effectués

- 1) pour une corrélation linéaire $Y = aX + b$
- 2) pour une corrélation exponentielle $Y = bExp(aX)$
- 3) pour une corrélation logarithmique $Y = aLn(X) + b$
- 4) pour une corrélation puissance $Y = bX^a$

Les constantes a, b et r sont des coefficients que nous allons définir dans la suite suivant le type de régression.

2.2.1. Démarches

$$A = \frac{N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (51)$$

$$B = \frac{\sum X_i^2 \sum Y_i - \sum X_i Y_i \sum X_i}{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (52)$$

$$r = \frac{N \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{N \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \times \sqrt{N \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2}} \quad (53)$$

Dans la suite, nous donnerons la valeur de chaque coefficient suivant la régression choisie.

Nous ferons les calculs en utilisant les résultats obtenus pour les tests.

2.2.1.1. Régression linéaire

$$a=A$$

$$b=B$$

2.2.1.2. Régression exponentielle

$$a=A ;$$

$$b = \text{Exp}(B)$$

2.2.1.3. Régression logarithmique

$$a = A ;$$

$$b = B$$

2.2.1.4. Régression puissance

$$a = A ;$$

$$b = 10^B$$

2.2.2. Les résultats

Après calcul, nous avons pour chaque type de régression les résultats suivants

2.2.2.1. Sans gaz chauds ni injection d'eau

2.2.2.1.1. Régression linéaire

$$A=0,74;$$

$$B=0,123 ;$$

$$r = 0,9675$$

$$\rightarrow Y = 0,74X + 0,123$$

2.2.2.1.2. Régression exponentielle

$$a=1,51 ;$$

$$B=-1,50 ;$$

$$r=0,979 ;$$

$$\rightarrow Y = 0,22\text{Exp}(1,51X)$$

2.2.2.1.3. Régression logarithmique

$$A=0,36 ;$$

$$B=0,76 ;$$

$$r=0,963 ;$$

$$\rightarrow Y = 0,36\text{Ln}(X) + 0,76$$

2.2.2.1.4. Régression puissance

$$A=0,73 ;$$

$$B=-0,08 ;$$

$$r=0,9778 ;$$

$$\rightarrow Y = 0,83X^{0,73}$$

Par comparaison des coefficients de corrélation, nous pouvons affirmer que la régression exponentielle est la meilleure.

Nous avons comme équation du taux d'humidité :

$$H_{\text{expérimentale}} = 0.2233 e^{1,5107 H_{\text{théorique}}} \quad (54)$$

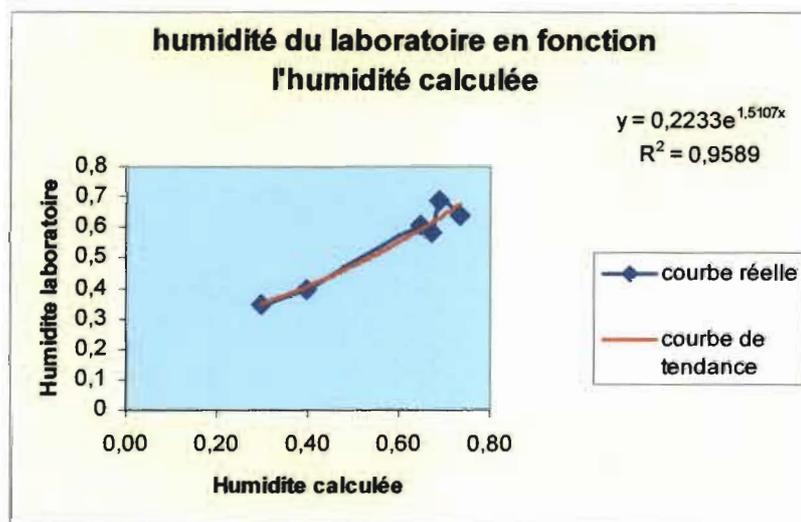


Fig. II.2. Humidité du laboratoire en fonction de l'humidité calculée cas sans gaz chauds

2.2.2.2. Avec gaz chauds injectée dans le broyeur

2.2.2.2.1. Régression linéaire

$$A=0,568 ;$$

$$B=0,116;$$

$$r = 0,7009$$

$$\rightarrow Y = 0,568X + 0,116$$

2.2.2.2.2. Régression exponentielle

$$a=1,81 ;$$

$$B=-1,81 ;$$

$$r=0,6895 ;$$

$$\rightarrow Y = 0,16Exp(1,81X)$$

2.2.2.2.3. Régression logarithmique

$$a=0,15 ;$$

$$b=0,48 ;$$

$$r=0,6558 ;$$

$$\rightarrow Y = 0,15 \ln(X) + 0,48$$

2.2.2.2.4. Régression puissance

$$a=0,49 ;$$

$$B=-0,28 ;$$

$$r=0,6438 ;$$

$$\rightarrow Y = 0,52 X^{0,49}$$

2.2.2.2.5. Régression polynomiale

Nous ne disposons de théories pour ce type de régression.

Cependant, en utilisant le logiciel Excel, nous trouvons que le coefficient de corrélation de la régression polynomiale est égal à 1.

Par comparaison des coefficients de corrélation, nous pouvons affirmer que la régression polynomiale est la meilleure.

Nous avons comme équation

$$H_{\text{expérimentale}} = 14,64 H_{\text{théorique}}^2 - 8,1741 H_{\text{théorique}} + 1,353 \quad (55)$$

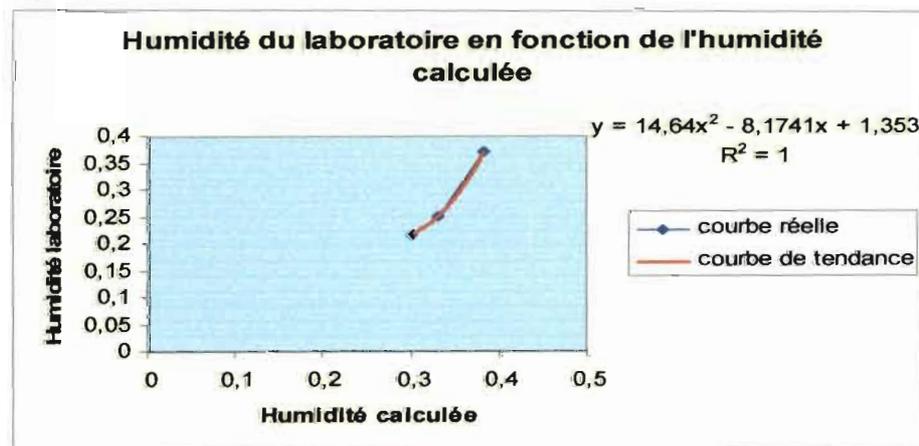


Fig. II.3. Humidité du laboratoire en fonction de l'humidité calculée cas avec gaz chauds
Ainsi, pour le cas sans les gaz chauds, l'humidité expérimentale est liée par une fonction exponentielle à l'humidité théorique.

La fonction est polynomiale dans le cas avec gaz chauds.

PARTIE III:

ETUDE DE SON IMPACT SUR LE BILAN DE LA CUISSON

L'étude de l'impact du taux d'humidité du ciment sur la cuisson consiste à voir les conséquences d'un ajustement de ce taux dans cet atelier.

En effet, une diminution du taux d'humidité à la sortie du broyeur passe par un apport d'une source de chaleur supplémentaire. Dans le cas de l'effet sur la cuisson, seuls les gaz chauds peuvent constituer cette source.

Chapitre 1 : NOTION DE BASES

Pour réaliser le bilan énergétique, nous rappelons les définitions de quelques paramètres :

1.1. Théories de la combustion

Le but de la combustion est de créer de la chaleur pour le processus de formation du clinker. C'est pourquoi la chaleur produite par la combustion doit être transférée vers la matière dans la zone de combustion.

1.1.1. Combustibles et comburant

La réaction chimique de combustion ne peut se produire que si l'on réunit trois éléments : un combustible, un comburant, une énergie d'activation en proportion suffisante. Les combustibles utilisés aux Ciments Du Sahel sont le fioul lourd et le charbon.

Le comburant est de l'air ambiant, et plus particulièrement de l'un de ses composants principaux, l'oxygène. Ce comburant est divisé en trois airs dans les fours à ciment.

1.1.2. Distribution des airs

L'air de combustion se compose :

1.1.2.1 L'air primaire : dans le cas particulier d'un four moderne de cimenterie, l'air primaire représente 8 à 12% de l'air total. Il permet une combustion immédiate mais partielle du combustible et l'accrochage de la flamme. En faisant varier le débit et la pression d'injection on modifie la forme de la flamme.

1.1.2.2. L'air secondaire : il provient du refroidisseur de clinker. Il pénètre dans le four par la zone du capot de chauffe. L'air secondaire est régulé par le registre de la conduite des gaz par le biais du tirage du four.

1.1.2.3. L'air tertiaire : l'air tertiaire vient aussi du refroidisseur et est acheminé vers le calcinateur par une gaine.

1.1.3 Les brûleurs

Les brûleurs sont conçus pour bien mélanger le combustible et l'air de combustion et, lorsque les combustibles sont liquides (comme le fioul), les pulvériser pour l'allumage. Un bon mélange de combustible et d'air s'obtient en créant de la turbulence à la sortie du brûleur. Il faut pour cela produire une chute de pression entre la gaine d'alimentation en air du brûleur et la sortie du brûleur au four.

Au niveau des Ciments du Sahel, nous avons deux types de brûleurs :

1.1.3.1. Un brûleur principal pour la combustion au niveau du four ;

1.1.3.2. Les brûleurs secondaires pour la combustion au niveau du précalcinateur.

1.1.4. Energie calorifique et pouvoir calorifique

La chaleur est une forme d'énergie. Cette forme d'énergie est appelée énergie calorifique.

Le pouvoir calorifique est l'énergie dégagée sous forme de chaleur par la réaction de combustion par l'oxygène

On distingue :

1.1.4.1. Le pouvoir calorifique supérieur (PCS) : c'est l'énergie résultant de la combustion à laquelle on ajoute l'énergie que la vapeur d'eau restitue à son environnement en se condensant.

1.1.4.2. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) : c'est l'énergie résultant de la combustion sans tenir compte de l'énergie consacrée à la vaporisation de l'eau.

En technologie cimentière, c'est le pouvoir calorifique inférieur qui est à considérer car la cheminée évacue toujours les fumées à plus de 100°C

1.1.5. Efficacité et rendement énergétique

L'efficacité énergétique est le rapport du montant total de l'énergie consommée (MJ) par la quantité totale de la production provenant de cette énergie.

$$\text{Efficacité} = \frac{W}{\text{énergie fournie}} \quad (56)$$

Avec W : énergie consommée

L'augmentation de l'efficacité énergétique permet de réduire les consommations d'énergie à service rendu égal. Cela entraîne la diminution des coûts écologiques, économiques, et sociaux liés à la production et à la consommation.

Par rendement énergétique, on distingue :

- le rendement énergétique brut qui est le changement au cours d'une période donnée de la quantité d'énergie utilisée pour fabriquer une quantité donnée de produits.
- le rendement énergétique net qui concerne les changements de la production énergétique suite à d'efforts conscients de la gestion de l'énergie.

1.1.6. La calcination

La perte au feu ou (lost on ignition en anglais) est la perte de masse qui résulte de l'échauffement du matériau.

La calcination est une technique de préparation d'échantillon utilisée en chimie analytique qui permet de prendre en compte ce phénomène. Elle consiste à chauffer l'échantillon sous air à haute température (typiquement 500 à 1000°C) pour provoquer des réactions physiques et chimiques et mettre ainsi l'échantillon dans un état de référence.

1.1.6.1. Réactions chimiques et physiques

Lors du chauffage, il se produit diverses réactions qui modifient l'échantillon :

- A 100°C : l'eau libre se vaporise
- Au dessus, l'eau liée se libère (par exemple des molécules d'eau liées dans le gypse, l'argile)
- Vers 550°C, la matière organique brûle donnant du gaz carbonique (CO₂) et du graphite (C).
- Le carbone s'oxyde lentement pour former du gaz carbonique ou du monoxyde de carbone ;
- Les carbonates se décomposent par exemple
$$\text{CaCO}_3 \longrightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$$
- Les métaux s'oxydent

- Les sels volatils se vaporisent.

1.1.6.2. Pertes au feu

La perte au feu est la perte de masse qui résulte de l'échauffement d'un matériau.

Si de telles réactions prennent place, on peut avoir :

- Une perte de masse, du fait du départ des espèces volatiles ; c'est la perte au feu.
- Une perte de masse, dû à l'incorporation d'atome d'oxygène (oxydation) ; on parle de « perte au feu négative » ou parfois de « gain au feu » (gain on ignition, GOI)

La perte au feu est donc simplement la différence de masse :

Perte au feu = (masse avant calcination) – (masse après calcination)

On l'exprime parfois en pourcentage

$$\text{Perte au feu (\%)} = \frac{100(\text{masse. avant. calcination..} - \text{masse. après. calcination})}{\text{masse. avant. calcination}}$$

1.2. Les différents modes de transmission de chaleur

Il existe plusieurs modes de transmission de chaleur :

1.2.1. la conduction

C'est le transfert de chaleur dans une paroi opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température.

La théorie de la conduction repose sur la loi de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température.

$$\vec{\varphi} = -\lambda \text{grad}(T) \quad (\text{W/m}^2) \quad (57)$$

avec : φ : densité de chaleur transmis par conduction (W/m^2) ;

λ : Conductivité thermique du milieu ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$).

1.2.2. la convection

C'est le transfert de chaleur entre un fluide et la surface d'un solide, les deux étant à des températures différentes, l'énergie est transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton.

$$\varphi = h \times S \times (T_p - T_\infty) \quad (\text{W}) \quad (58)$$

avec : φ : Flux de chaleur transmis par convection (W) ;

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection ($\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$). ;

T_p : Température de la surface du solide ($^\circ\text{C}$) ;

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide ($^\circ\text{C}$) ;

S : Aire de contact solide/fluide (m^2) ;

La convection est dite forcée si le fluide est mis en mouvement par une action extérieure (pompe, ventilateur, vent...). La convection est dite naturelle si le mouvement du fluide ne résulte que des différences de masse volumique induites par des différences de températures.

1.2.3. Le rayonnement

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces en regard à des températures différentes.

Dans les problèmes de transfert thermique, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant.

L'émittance d'un corps noir (émetteur parfait) est obtenue par la loi de Stefan Boltzmann.

$$M_o = \sigma T^4 \quad (59)$$

L'émittance d'un corps réel est obtenue à partir de la relation :

$$M = \varepsilon \sigma T_p^4 \quad (60)$$

où

ε : Émissivité de la surface (égale à $\frac{M}{M_o}$) ;

σ : Constante de Stefan Boltzmann ($5,67.10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$) ;

T_p : Température de surface de la paroi en K.

Chapitre 2 : LE BILAN D'ENERGIE DE LA CUISSON

La ligne de cuisson est constituée de la tour échangeur, du four et du refroidisseur de clinker.

2.1. Mouvement d'énergie thermique

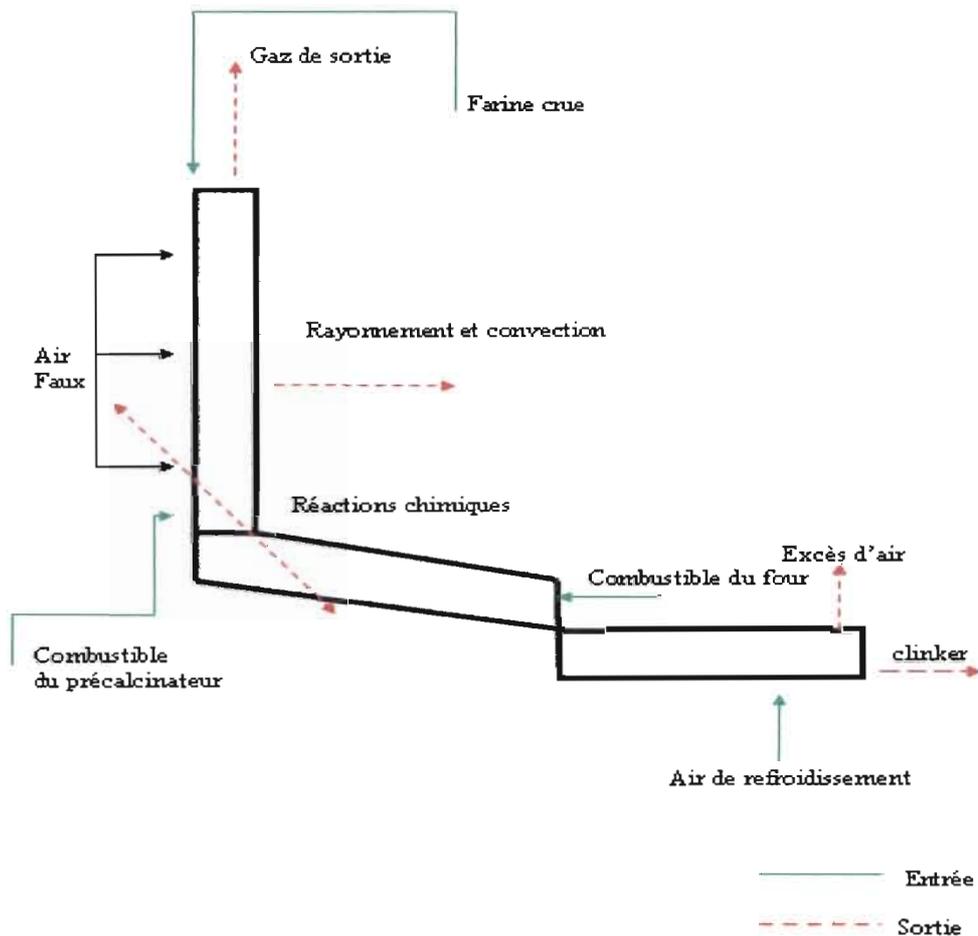


Fig. III.1.: Mouvements d'énergie thermique de la ligne de cuisson

2.1.1 Au niveau de la tour échangeur

La farine crue entre par la tour échangeur en contre courant avec les gaz chauds. Avant l'entrée de la farine au niveau du four, où il s'effectue l'amorçage du procédé de

clinkérisation nécessitant l'utilisation de combustibles au niveau du précalcinateur. Des réactions chimiques et particulièrement celle de la décarbonatation des produits carbonatés (CaCO_3) s'y effectuent.

Le sous système tour échangeur peut être modélisé comme suit :

Entrées : farine crue, combustibles et airs faux

Sorties : gaz chauds, réactions de décarbonatation, pertes par rayonnement et convection

2.1.2 Au niveau du four

Le four permet de réaliser la clinkérisation. La fabrication du clinker nécessite l'utilisation d'un combustible.

Durant la combustion au niveau du four, des pertes par rayonnement s'y effectuent au niveau de la virole.

Ainsi, nous pouvons modéliser le four comme suit :

Entrées : combustibles, airs faux

Sorties : rayonnement (virole du four) et convection.

2.1.3. Au niveau du refroidisseur de clinker

Le refroidisseur permet de refroidir le clinker sorti du four. Cet air de refroidissement obtenu à l'aide des ventilateurs de soufflage, peut être décomposé en air chaud, utilisé par la tour échangeur et en excès d'air utilisé par les broyeurs.

Le refroidisseur peut être modélisé comme suit :

Entrées : air de refroidissement

Sorties : excès d'air et clinker refroidis

2.2. Les équations du bilan

Les énergies sont évaluées en kcal/kg de clinker et la température de référence est de 0°C

2. 2.1. Les apports : Sources de chaleur

2.2.1.1. Combustion

$$H_{fuel} = \frac{PCI \times Q_{mfuel}}{Q_{mclinker}} \quad (61)$$

H_{fuel} : Énergie de chaleur de la combustion en kcal/kg de clinker

PCI : pouvoir calorifique inférieur du combustible en kcal/kg de clinker

Q_{mfuel} : Débit massique du fuel en kg/h ; calculer avec la supervision durant la période

Q_{mclinker} : Débit massique de clinker en kg/h ; calculer avec la quantité de farine consommée et le facteur de clinkérisation durant la période.

2.2.1.2 Chaleur sensible

On appelle la chaleur sensible, la quantité de chaleur qui est échangée, sans transition de phase physique, entre deux corps formant un système isolé.

▪ Le combustible

$$H_{s\text{Four}} = Q_{mf} \times C_{p_f} \times \Delta T_f \times \frac{1}{Q_{m\text{clinker}}} \quad (62)$$

$$H_{s\text{Précal}} = Q_{mfb} \times C_{p_{fb}} \times \Delta T_{fb} \times \frac{1}{Q_{m\text{clinker}}} \quad (63)$$

$H_{s\text{Four}}$: énergie du fuel au niveau du brûleur principal en kcal/kg de clinker ;

$H_{s\text{Précal}}$: énergie du fuel au niveau des brûleurs secondaires en kcal/kg de clinker ;

Q_{mf} : débit massique du fuel au niveau du brûleur principal en kg/h ;

Q_{mfb} : débit massique du fuel au niveau des brûleurs secondaires en kg/h ;

ΔT_f : variation de la température du combustible au niveau du brûleur principal en K ;

ΔT_{fb} : variation de la température du combustible au niveau du brûleur secondaire en K ;

C_{p_f} : chaleur massique du fuel dans le brûleur principal en kcal.kg⁻¹.K⁻¹ ;

$C_{p_{fb}}$: chaleur massique du fuel dans le brûleur secondaire en kcal.kg⁻¹.K⁻¹.

▪ La farine crue

$$H_{fa} = Q_{mfa} \times C_{p_{fa}} \times \Delta T_{fa} \times \frac{1}{Q_{m\text{clinker}}} \quad (64)$$

Q_{mfa} : débit massique de la farine crue en kg/h

$Q_{mclinker}$: débit massique du clinker en kg/h

ΔT_{fa} : variation de la température de la farine en Kelvins

C_{pfa} : chaleur massique de la farine de l'alimentation en kcal.kg⁻¹.K⁻¹ donnée en **annexe 3** en fonction de la température

H_{fa} : énergie de la farine crue en kcal/kg de clinker

2. 2.1.3. Air primaire

A l'aide d'un anémomètre, nous mesurons la vitesse de l'air à l'aspiration du ventilateur. Connaissant la section et le débit volumique nous en déduisons le débit massique qui est donné par cette relation.

$$Q_{Ap} = \rho_{Ap} \times Q_{vAp} \quad (65)$$

La variation de la masse volumique en fonction de la température est donnée par :

$$\rho = \rho_0 \times \frac{273}{T + 273} \quad (66)$$

On prend le débit à la supervision Q_v en Nm³.

Dans les conditions normales de pression et de température (CNTP), $\rho_0 = 1,285 \text{ Kg/m}^3$, $P_0 = 1 \text{ atm} = 1,013.10^5 \text{ Pa}$, $T_0 = 0^\circ\text{C}$

$$H_{Ap} = \rho_{Ap} \times Q_{Ap} \times C_{pAp} \times \Delta T_{Ap} \times \frac{1}{Q_{mclinker}} \quad (67)$$

H_{Ap} : énergie de l'air primaire en kcal/kg de clinker ;

ρ_0 : masse volumique de l'air dans les CNTP en Kg/m³ ;

ρ_{Ap} : masse volumique de l'air primaire en Kg/m³ ;

Q_{Ap} : débit massique de l'air primaire en kg/h ;

Q_{vAp} : débit volumique de l'air primaire en m³/h ;

ΔT_{Ap} : variation de la température de l'air primaire en K ;

T : la température de l'air primaire en °C ;

$C_{p\ Ar}$: chaleur massique de l'air primaire en kcal.kg⁻¹.K⁻¹ donnée en **annexe 3** en fonction de la température

2. 2.1.4. Air de refroidissement

On est dans les CNTP (P= 1.013 Pa, t = 0°C $\rho_o=1,285$ Kg/m³)

$$Q_{Vo\ Ar} = \sum_1^4 Q_{Vi\ Ar} \quad (68)$$

$$H_{Ar} = \rho_{\hat{a}Ar} \times Q_{V_a\ Ar} \times C_{p\ Ar} \times \Delta T_{Ar} \times \frac{1}{Q_{m\ clin\ ker}} \quad (69)$$

H_{Ar} : énergie de l'air de refroidissement en kcal/kg de clinker ;

ρ_{oAr} : masse volumique de l'air de refroidissement calculée avec l'équation (54) en Kg/m³ ;

$Q_{Vo\ Ar}$: débit volumique de l'air de refroidissement des ventilateurs en m³/h ;

$Q_{Vi\ Ar}$: débit volumique de l'air de refroidissement d'un ventilateur en m³/h ;

$Q_{m\ clin\ ker}$: débit massique du clinker en kg/h ;

$C_{p\ Ar}$: chaleur massique de l'air de refroidissement en kcal.kg⁻¹.K⁻¹ donnée en **annexe 3** en fonction de la température ;

ΔT_{Ar} : variation de la température de l'air de refroidissement en K.

2.2.1.5. Retour de poussière du bag house

Le retour de poussière est constitué de la quantité de poussière avec broyeur cru en marche et de la quantité de poussière avec broyeur cru à l'arrêt :

$$H_{rp} = Q_{m\ rp} \times C_{p\ rp} \times \Delta T_{rp} \times \frac{1}{Q_{m\ clin\ ker}} \quad (70)$$

H_{rp} : énergie de retour poussière du bag house en kcal/kg de clinker ;

$Q_{m\ rp}$: débit massique de retour poussière en kg/h ;

$Q_{m\ clin\ ker}$: débit massique du clinker en kg/h ;

$C_{p\ rp}$: chaleur massique de retour poussière du bag house en kcal.kg⁻¹.K⁻¹ ;

ΔT_{rp} : variation de la température de retour poussière du bag house en K.

2.2.2. Les pertes

Le four utilisé au niveau des Ciments Du Sahel est un four à haute température. Une partie importante de la chaleur est fournie directement par le rayonnement de la flamme dans une zone de radiation. Le transfert de chaleur s'y fait essentiellement par rayonnement de la flamme et des gaz issus de la combustion.

A la suite d'études expérimentales, le fabricant FLSmidth a proposé des formules de calculs pour le rayonnement et la convection.

2.2.2.1. Rayonnement

La radiation au niveau du four en kcal/kg de clinker est déterminée à partir de la relation :

$$H_R = 4.10^{-8} \times (T_r^4 - T_{or}^4) \times A_r \times \frac{1}{Q_{mclinker}} \quad (71)$$

T_o : température de la surface en K ;

T_r : température du milieu environnant la surface en K ;

A_r : Surface d'échange pour le rayonnement en m^2 .

Plus on monte dans la tour de cyclone ou tour échangeur, plus la température des gaz diminue en raison de l'augmentation de la perte par rayonnement.

2.2.2.2. Convection

La convection au niveau du four en kcal/kg de clinker est déterminée à partir de la relation :

$$H_{cn} = 80,33 \times \left(\frac{T + T_o}{2} \right)^{-0,724} \times (T - T_o)^{1,333} \times A \times \frac{1}{Q_{mclinker}} \quad (72)$$

Pour une vitesse d'air inférieur à 3 m/s

$$H_{cf} = 28,03 * \left(\frac{T + T_o}{2} \right)^{-0,351} \times V^{0,805} \times D^{-0,195} \times (T - T_o) \times A \times \frac{1}{Q_{mclinker}} \quad (73)$$

Pour une vitesse de l'air supérieur à 3 m/s

T : température de surface pour la convection en K ;

T_0 : température ambiante au niveau de la virole en K ;

V : vitesse de l'air en m/s ;

D : diamètre du corps et pour les surfaces planes $D_{\text{fictif}} = \frac{L+1}{2}$ en m ;

A : surface d'échange pour la convection en m^2 .

2.2.2.3. Pertes avec les gaz de sortie

▪ Produit de combustion avec l'excès d'air

En fonction de l'excès d'air noté λ et de la température des gaz de fumées, on peut trouver la quantité de chaleur perdue avec les gaz de fumées pour 1000 kcal de fuel consommé :

$$\% \text{Excés. d'air} = \frac{79 \times \%O_2}{0,21 \times (100 - \%CO_2) - \%O_2} \quad (74)$$

Où

O_2 : pourcentage d'oxygène par volume dans gaz de combustion

CO_2 : pourcentage de dioxyde de carbone par volume dans gaz de combustion

$$H_{\text{per}} = \frac{H_{\text{tab}}}{1000} \times CSF \quad (75)$$

H_{per} : Énergie des gaz de fumées en kcal par kg de clinker ;

H_{tab} : Énergie des gaz de fumées en kcal/kg de clinker donnée en annexe en fonction de l'excès d'air et de la température des gaz de fumées ;

CSF=consommation spécifique de fuel en kcal/kg de clinker.

▪ Réaction de décarbonatation

Le CO_2 formé par la réaction de décarbonatation sort avec les gaz de fumées à la température de celle-ci. Une fois son débit et la température des gaz connus, l'énergie perdue est calculée à l'aide de la chaleur massique du CO_2 .

La masse de CO_2 est déterminée à partir du bilan de matière.

$$Q_{mCO_2} = Q_{fa} \cdot \frac{\%totalCaCO_3 \times 44}{100 \times 100} \text{ avec } M_{CO_2} = 44 \text{ g/mol et } M_{CaCO_3} = 100\text{g/mol} \quad (76)$$

Avec

$$Q_{fa} = Q_{mclinker} \times \frac{100}{100 - LOI} \quad (77)$$

$$H_{CO_2} = Q_{mCO_2} \times C_{pa} \times \Delta T_a \times \frac{1}{Q_{mclinker}} \quad (78)$$

La température du CO₂ est égale à celle des gaz de fumées

H_{CO₂} : énergie de CO₂ contenu dans l'alimentation du four en kcal/kg de clinker ;

Q_{fa} : débit massique de la farine crue en kg/h ;

Q_{mCO₂} : débit massique de CO₂ en kg/h ;

C_{pa} : chaleur massique de CO₂ contenu dans l'alimentation du four en kcal.kg⁻¹.K⁻¹ donnée en **annexe 3** en fonction de la température ;

ΔT_a : variation de la température de CO₂ contenu dans l'alimentation du four en K ;

LOI : perte au feu calculée avec l'**annexe 6** ;

Q_{mclinker} : débit massique de clinker en kg/h.

▪ H₂O libre avec l'alimentation du four

C'est l'eau qui s'évapore à 100°C.

$$Q_{meau_libre} = Q_{fa} \times \frac{\%eau_libre}{100 - \%eau_libre} \quad (79)$$

$$H_{eau_libre} = Q_{meau_libre} \times \frac{H_{eau_libre_spécifique}}{Q_{mclinker}} \quad (80)$$

H_{eau_libre_spécifique} : énergie spécifique de l'eau libre en kcal/kg de clinker donnée ;

H_{eau_libre} : énergie liée a l'eau libre dans l'alimentation du four en kcal/kg de clinker ;

Q_{meau_libre} : débit massique de l'eau libre en kg/h.

▪ H₂O liée avec l'alimentation du four

L'eau liée est chimiquement liée à la farine.

$$Q_{m_eau_liée} = Q_{fa} \times \frac{\%eau_liée}{100} \quad (81)$$

$$H_{eau_liée} = Q_{m_eau_liée} \times C_{pel} \times \Delta T_{el} \times \frac{1}{Q_{mclinker}} \quad (82)$$

$H_{eau_liée}$: énergie a l'eau liée dans l'alimentation du four l'eau liée en kcal/kg de clinker ;

$Q_{m_eau_liée}$: débit massique d'eau liée en kg/h ;

C_{pel} : chaleur massique de l'eau liée dans l'alimentation du four en kcal.kg⁻¹.K⁻¹ ;

ΔT_{el} : variation de la température de l'eau liée contenue dans l'alimentation en K ;

▪ Pertes avec les poussières

$$H_{poussière} = Q_{mpoussière} \times C_{ppo} \times \Delta T_{po} \times \frac{1}{Q_{mclinker}} \quad (83)$$

Le débit massique de poussière est obtenu par drop test des retours du bag house avec le broyeur à l'arrêt. On néglige les poussières venant du refroidisseur ramené par le FN030 à cause du cyclonage à la sortie du refroidisseur.

$H_{poussière}$: énergie de poussière en kcal/kg de clinker ;

$Q_{mpoussière}$: débit massique de poussière en kg/h ;

C_{ppo} : Chaleur massique de poussière en kcal.kg⁻¹.K⁻¹ est égale a la chaleur massique de la farine ;

ΔT_{po} : variation de la température de la poussière en K.

2.2.2.4. Pertes au niveau du refroidisseur

▪ Clinker

$$H_{clinker} = C_{pck} \times \Delta T_{ck} \text{ en kcal/kg} \quad (84)$$

$H_{clinker}$: perte de chaleur au niveau du refroidisseur de clinker en kcal/kg de clinker ;

C_{pck} : Chaleur massique de clinker au niveau du refroidisseur kcal.kg⁻¹.K⁻¹ donnée en

annexe 3 en fonction de la température ;

ΔT_{ck} : variation de la température de clinker au niveau du refroidisseur en K.

▪ Excès d'air

$$H_{ex} = Q_{mex} \times C_{pex} \times \Delta T_{ex} \times \frac{1}{Q_{mclinker}} \quad (85)$$

H_{ex} : perte de chaleur par l'excès d'air en kcal/kg de clinker ;

Q_{mex} : débit massique de l'excès d'air en kg/h ;

C_{pex} : Chaleur massique de l'excès d'air au niveau du refroidisseur kcal.kg⁻¹.K⁻¹ donnée en

annexe 3 en fonction de la température ;

ΔT_{ex} : variation de la température de l'excès d'air au niveau du refroidisseur en K ;

ρ_{ex} : masse volumique de l'air d'air calculée avec l'équation (66) en Kg/m³ ;

Détermination de Q_{mex} :

$$Q_{Vex} = N \times \frac{1}{n} \times \eta \times \frac{1}{\rho_{ex}} \times \frac{n_{ref}^2 \times \rho_{ref}}{P_{t,ref}} \quad (86)$$

n : vitesse du ventilateur en rpm ;

N : puissance du ventilateur en W ;

η : Rendement du ventilateur = 0,85 ;

ρ_{ex} : Densité du gaz propre en kg/m³ à la température de l'air ;

P_t : pression totale du gaz propre en Pa ;

X_{ref} : valeur de référence sur la courbe du ventilateur ;

$$Q_{mex} = \rho_{ex} \times Q_{Vex} = 3600 \times N \times \frac{1}{n^2} \times \eta \times \frac{n_{ref}^2 \times \rho_{ref}}{P_{t,ref}} \quad (87)$$

▪ Chaleur de formation

La chaleur de formation est constituée de la chaleur requise pour décomposer les carbonates, les silicates avec les alcalis et de l'eau chimiquement liée, de la chaleur libérée par la formation de silicates de calcium, les sulfates alcalins et éventuellement de la combustion composés de pyrites et organiques.

$$R = 7,646 \times CaO + 6,48 \times MgO + 2,22 \times Al_2O_3 + 11,6 \times \frac{100}{100 - LOI} \times H_2O - 5,116 \times S_1O_2 - 0,59 \times Fe_2O - 10 \times (K_2O + Na_2O)_{sul} \quad (88)$$

avec R : l'énergie de la chaleur de formation en kcal/kg de clinker

Toutes les valeurs en prises en % massique dans le clinker sauf pour l'eau combiné qui est pris dans le cru

CaO, M_gO et H_2O est la quantité de g/100g de clinker provenant de $CaCO_3$, M_gCO_3 et d'eau combinée dans le mélange cru.

S_1O_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 et les alcalis sont contenus en pourcentage dans le clinker.

Si la farine contient des combustibles tel que le C et le S, il faut corriger la formule retranchant :

$$- 79 \times C - 32 \times S \text{ en kcal/kg de clinker}$$

Où C et S représentent respectivement la quantité de carbone et de sulfate de pyrite provenant du mélange à cru par 100g de clinker.

C et S sont pris en % massique sur la farine crue.

Chapitre 3: ETUDE DE L'IMPACT DU TAUX D'HUMIDITE SUR LE BILAN DE LA CUISSON

En raison du caractère privé de notre étude, nous supposerons des valeurs de fonctionnement admises dans les cimenteries ayant les mêmes installations pour aborder cette partie.

3.1. Les paramètres du taux d'humidité liés à la cuisson

Le taux d'humidité du ciment est un paramètre qui a une influence manifeste sur la qualité du ciment.

Etant donné que le combustible utilisé représente des coûts dans l'exploitation de la cimenterie, il s'avère donc évident qu'une simple augmentation ou diminution du taux d'humidité du ciment va avoir un impact sur la rentabilité économique.

Comme nous le montre l'équation (50) ce taux dépend de plusieurs paramètres tels que les matières fraîches, l'apport de chaleur des boulets et les gaz chauds.

Cependant, dans ce paragraphe, seuls les gaz chauds sont à considérer. En effet, toute étude de l'impact de taux d'humidité devra passer par ces derniers car étant les seuls ayant un lien direct avec la ligne de cuisson. Les gaz chauds sont caractérisés par leur température et leur débit massique. Ils proviennent de l'excès d'air sortant du refroidisseur à clinker.

Pour faire l'étude de l'impact du taux d'humidité du ciment sur le bilan de la cuisson nous avons pris certains paramètres de fonctionnement des ateliers de cuisson et de broyage en mode référence c'est le cas où la température des gaz chauds est égale dans nos calculs à 345°C. De plus certains paramètres tels que les débits de matières fraîches, la puissance du broyeur et la température de la virole du broyeur, ont été affectés d'une valeur égale à celle généralement obtenue.

Ainsi la température du mélange des gaz à l'entrée du broyeur est maintenue constante à une valeur de 215°C. Cette température constitue la valeur maximale admissible.

3.2. Influence de la variation d'humidité sur les paramètres opérationnels

La répartition de l'excès d'air est une phase importante dans le processus de fabrication du ciment. De sa distribution dépendent :

- L'alimentation du broyeur cru
- L'alimentation du broyeur ciment
- L'alimentation du broyeur charbon
- La combustion du combustible au niveau du four et du précalcinateur.

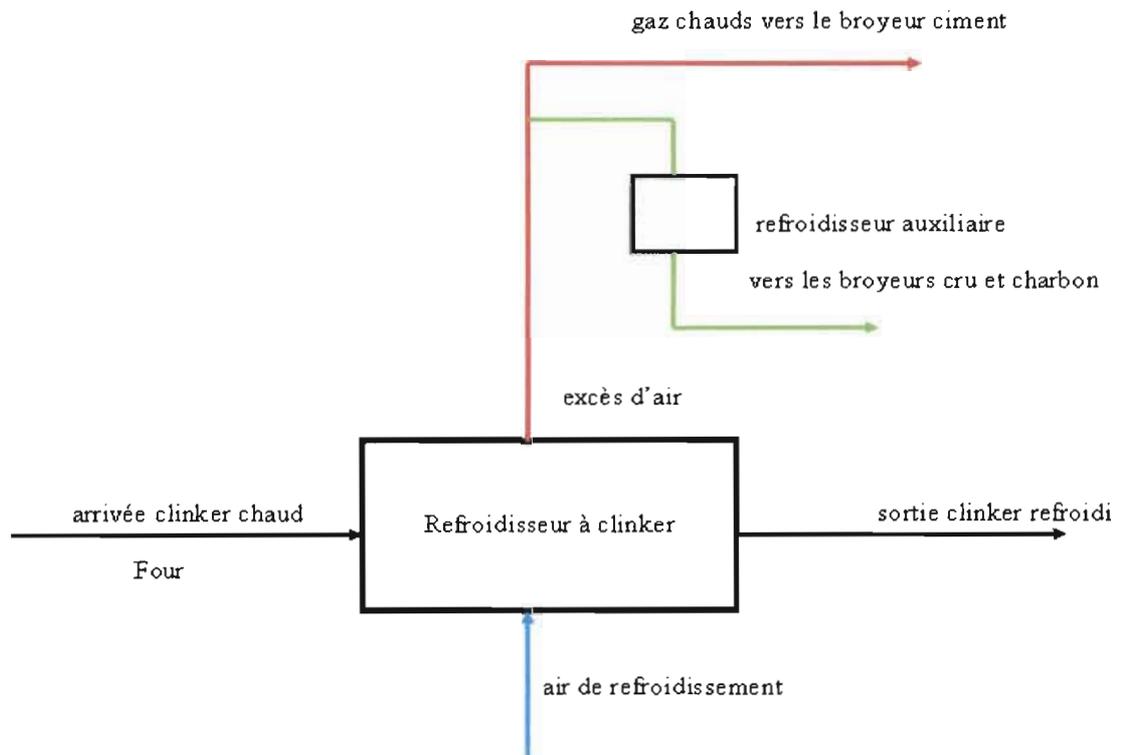


Fig.III.2 répartition de l'excès d'air du refroidisseur à clinker

Il en découle une nécessité d'une gestion rigoureuse du flux de gaz chauds pour assurer la qualité dans toutes les étapes du processus.

3.2.1. Calcul du débit du mélange de gaz chauds

Nous avons à l'équilibre thermique du mélange de gaz :

$$Q_{E_3A} \times C_{P_{air}} \times \Delta T_{air} + Q_{E_2g} \times C_{P_G} \times \Delta T_{air} = Q_{AG} \times C_{P_{AG}} \times \Delta T_{AG} \quad (89)$$

en négligeant la variation des chaleurs massiques nous aurons :

$$Q_{E_2g} = \frac{T_{AG} - T_{air}}{T_G - T_{AG}} \times Q_{E_3A} \quad (90)$$

3.2.2. Calcul de la variation du taux d'humidité

En prenant comme référence une température des gaz chauds $T_G = 345^\circ\text{C}$ et celle du mélange $T_{AG} = 215^\circ\text{C}$ constante, nous en déduisons les autres paramètres

Ainsi, en diminuant la température des gaz chauds d'un pas de 5°C et en déroulant notre programme Excel, nous déterminons le taux d'humidité correspondant pour chaque cas.

3.3. Evaluation financière :

Cette phase nous permet de savoir les tendances entre une réduction du taux d'humidité et les variations de la température et du débit des gaz chauds. Elle détermine la quantité du fuel injecté pour atteindre le taux d'humidité souhaité. La valeur économique de cette quantité est l'impact de la réduction du taux d'humidité sur le bilan thermique de la cuisson.

L'interprétation du tableau III.1 et de la figures III.5 nous permet de conclure que :

La réduction du taux d'humidité entraîne une augmentation de la quantité de fuel injectée et par conséquent le coût de la tonne de ciment

La figure (Fig. III.3) montre une augmentation de la quantité de gaz chauds injectés dans le broyeur lorsque l'on veut réduire le taux d'humidité du ciment.

Cette augmentation est représentée par l'équation suivante :

$$\text{Débit gaz chauds} = 63,481 \times \text{Valeur réduction du taux} + 1,855 \quad (91)$$

Les figures (Fig.III.4) et (Fig. III.5) montrent respectivement qu'une réduction du taux d'humidité augmente les pertes au niveau du refroidisseur à clinker et le coût horaire du fuel utilisé.

3.3.1. Calcul du débit de fuel injecté :

en utilisant l'équation (61) nous avons :

$$Q_{mfuel} = \frac{H_{fuel} \times Q_{mclinker}}{PCI} \quad (92)$$

Avec PCI = 9631 kcal/kg

3.3.2. Calcul du coût de la consommation de fuel :

$$\text{Coût} = Q_{mfuel} \times \text{Prix tonne} \quad \text{en prenant un prix par tonne de fuel} = 224.000\text{FCFA} \quad (93)$$

Tableau III.1. : Variation de la température des gaz chauds et de la quantité du fuel en fonction de la variation du taux d'humidité

$\Delta T_G(^{\circ}\text{C})$	$\Delta T_{AG}(^{\circ}\text{C})$	$Q_{E2g}(\text{t/h})$	$X_o(\%)$	$\Delta X_o(\%)$	$\Delta Hex(\text{kcal/kg CK})$	$Q_{mfuel}(\text{t/h})$	coût(CFA/h)
345	215	1,85	0,30	0,00	0,00	0,00000	0
340	215	1,93	0,30	0,00	1,29	0,01003	2247
335	215	2,01	0,30	0,00	2,58	0,02006	4492
330	215	2,10	0,30	0,00	3,86	0,03007	6736
325	215	2,19	0,30	0,01	5,15	0,04007	8977
320	215	2,30	0,30	0,01	6,43	0,05007	11216
315	215	2,41	0,29	0,01	7,71	0,06006	13453
310	215	2,54	0,29	0,01	8,99	0,07003	15688
305	215	2,68	0,29	0,01	10,27	0,08000	17921
300	215	2,84	0,29	0,02	11,55	0,08996	20152
295	215	3,01	0,28	0,02	12,83	0,09991	22380
290	215	3,21	0,28	0,02	14,11	0,10985	24607
285	215	3,44	0,28	0,03	15,38	0,11979	26832
280	215	3,71	0,27	0,03	16,66	0,12971	29055
275	215	4,02	0,27	0,03	17,93	0,13962	31275
270	215	4,38	0,26	0,04	19,20	0,14953	33494
265	215	4,82	0,26	0,05	20,47	0,15942	35710
260	215	5,36	0,25	0,06	21,74	0,16931	37925
255	215	6,03	0,24	0,07	23,01	0,17919	40137
250	215	6,89	0,22	0,08	24,28	0,18905	42348
245	215	8,04	0,21	0,10	25,54	0,19891	44556
240	215	9,64	0,18	0,12	26,81	0,20876	46763
235	215	12,06	0,14	0,16	28,07	0,21860	48967
230	215	16,07	0,08	0,22	29,33	0,22843	51169

Avec :

X_o : taux d'humidité du ciment calculé en (%)

ΔX_o : variation du taux d'humidité du ciment calculé en (%)

Coût : coût financier du fuel nécessaire calculé en CFA/heure et en CFA/tonne de ciment

A partir du tableau précédent, nous pouvons tracer les courbes de ces paramètres en fonction de la variation de taux d'humidité du ciment (sens d'une réduction)

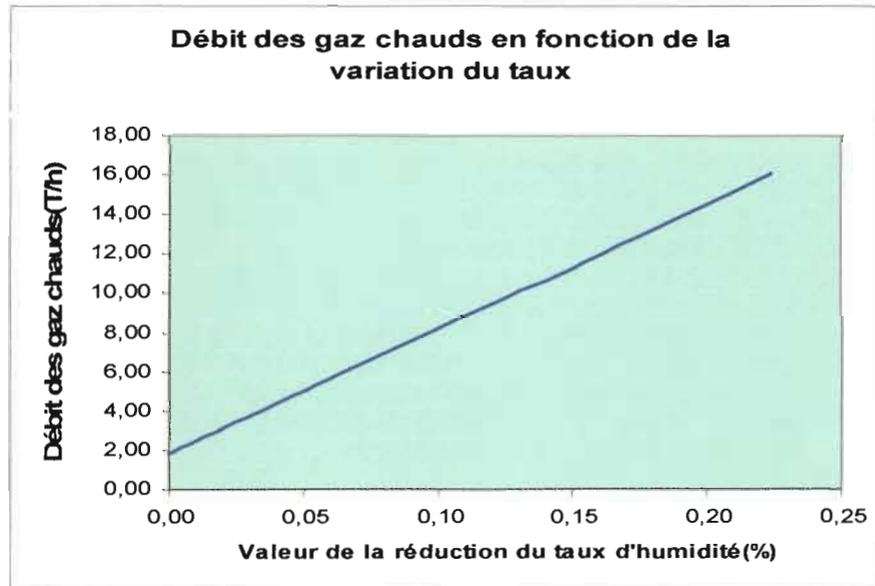


Fig.III.3. Débit des gaz chauds en fonction de la réduction du taux l'humidité du ciment

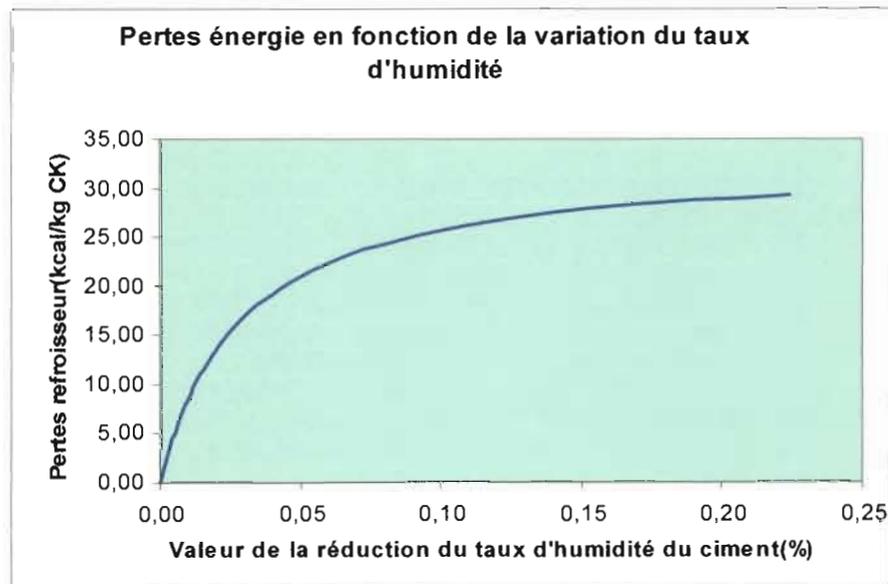


Fig.III.4: Pertes refroidisseur en fonction de la réduction de l'humidité du ciment

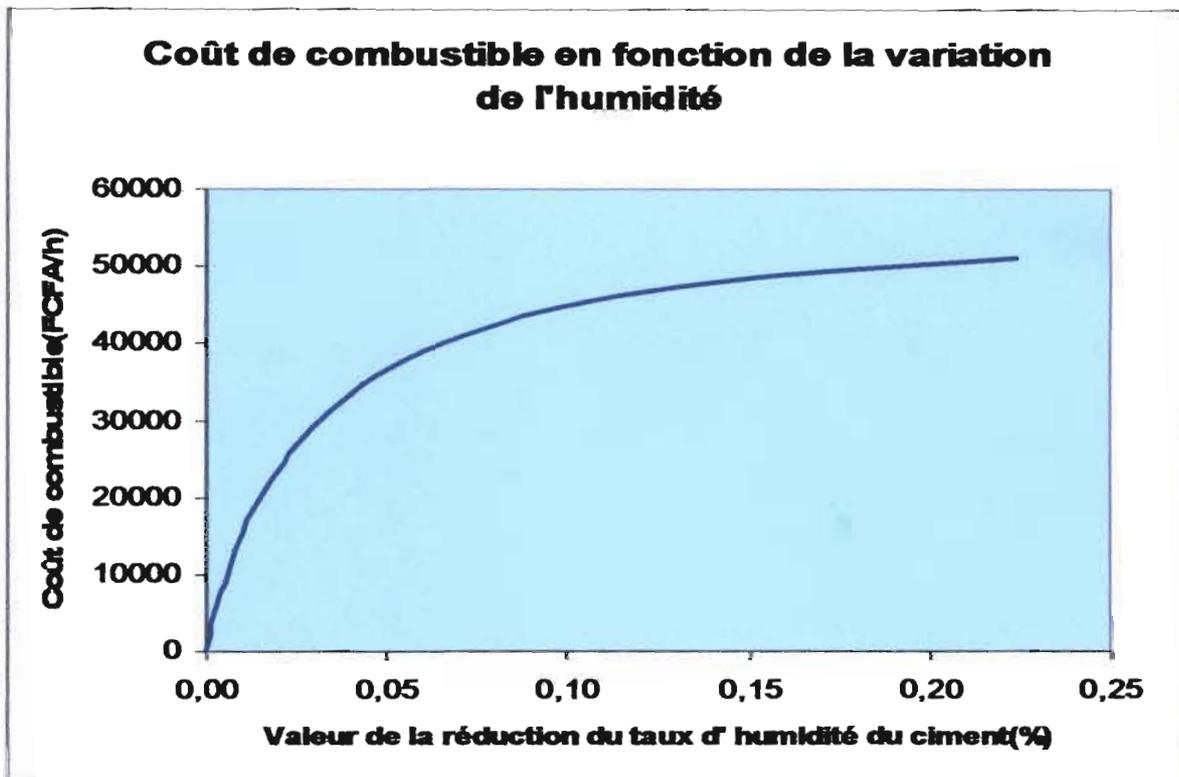


Fig.III.5. Coût du fuel en (F CFA/h) en fonction de la réduction de l'humidité du ciment

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le projet de fin d'étude (PFE) présenté dans ce rapport a porté sur la prédiction du taux d'humidité du ciment et sur l'étude de son impact sur le bilan de la cuisson du clinker à la cimenterie les Ciments Du Sahel. Après avoir établi le bilan énergétique du broyeur nous avons proposé une équation du taux d'humidité du ciment. Une corrélation avec les résultats du laboratoire nous a permis d'affiner l'équation en lui donnant une régression exponentielle pour le cas où le four est à l'arrêt, c'est-à-dire sans gaz chauds et une régression polynomiale lorsque nous prenons en compte les gaz chauds. L'influence de ce taux d'humidité a été étudiée après avoir identifié les paramètres opératoires. Des schémas de conduite ont été proposés dans le but de connaître les coûts énergétique et économique engendrés au niveau du combustible sur toute action sur le taux d'humidité.

Cependant, malgré les efforts consentis, il n'en demeure pas moins que ce travail présente certaines limites.

En effet, nous n'avons pas étudié le cas où il y a une injection d'eau pour le refroidissement à l'intérieur du broyeur.

C'est dans ce cadre que nous recommandons :

- De refaire 25 à 30 mesures sans gaz chauds pour affiner la corrélation et d'effectuer le même travail avec les gaz chauds
- De poser un débitmètre pour étudier le cas avec injection d'eau.
- De faire un piquage sur la gaine des gaz chauds pour avoir son débit réel.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] FLSMIDTH "*Comminution manual*", Vigerslev Alle 77 DK.2500 Valby Copenhagen Denmark 2001.
- [2] C.L.Mamzic; "*Statistical Process Control*", II. Series TS156.8.S752, US.1994.
- [3] FLSmiDth; "*Les Ciments Du Sahel -Cimenterie de Kirène Cours de production*" Volume 3 ; Edition 2005.
- [4] BASTIER, Robert ; Techniques de l'Ingenieur, traité de genie énergétique ; "*Four de cimenterie : atelier de cuisson du clinker*" BE 8842, Edition 2001
- [5] BASTIER, Robert ; Techniques de l'Ingénieur, traité de génie énergétique ; "*Four de cimenterie : refroidisseur à clinker*" BE 8846, Edition 2001
- [6] Série de la gestion de l'énergie à l'intention des industries, commerces et institutions, "*Fours, sécheur et four de cuisson*" Ressources naturelles Canada, Office de l'Efficacité énergétique , volume 7, Edition 2001
- [7] US. Department of energy "*DOE Fundamentals Handbook thermodynamics, Heat Transfert, and Fluid Flow*" volume 1-1992.
- [8] GAYE Salif ; "*Notes de cours de Transferts de chaleur*" ; Ecole Supérieure Polytechnique, Centre de Thiès, 2005-2006.
- [9] SARR Ngor ; "*Notes de cours Gestion des Opérations et de la Production I & II*" ; Ecole Supérieur Polytechnique, Centre de Thiès, 2005-2006.
- [10] Webographie :
<http://www.thermexel.com>
<http://www.wikipedia.com>
<http://www.oee.rncan.gc.ca>

ANNEXES

Annexe 1 : Analyse dimensionnelle du bilan d'énergie du broyage ciment

$$\checkmark \quad H = Q \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$[H] = \left[\frac{t}{h} \times \frac{kcal}{kg \cdot C} \times ^\circ C \right] = \left[\frac{t}{h} \times \frac{kcal}{10^{-3} \cdot t \times ^\circ C} \times ^\circ C \right] = \left[\frac{10^3 \cdot kcal}{h} \right] = [Mcal / h]$$

$$\checkmark \quad Q = \rho \times Q_v = 3600 \times 10^{-3} \times N \times \frac{1}{n^2} \times \eta \times \frac{n_{ref}^2 \times \rho_{ref}}{P_{t,ref}}$$

$$[Q] = [10^{-3} \times kg / h] = [t / h]$$

$$\checkmark \quad Q_v = S \times V$$

$$[Q_v] = \left[m^2 \times \frac{m}{h} \right] = [m^3 / h]$$

$$\checkmark \quad Q = \rho \times Q_v$$

$$[Q] = \left[\frac{t}{m^3} \times \frac{m^3}{h} \right] = [t / h]$$

$$\checkmark \quad H_{E,p} = 0,95 \times C \times P$$

$$[P] = [kw] \text{ avec } C = \text{constante}$$

$$[1kw] = [860kcal / h] = [860 \cdot 10^{-3} \cdot kcal / h] = [0,86 \cdot Mcal / h]$$

$$\checkmark \quad [H_{E,p}] = [0,95 \cdot 0,86 \cdot P] = [Mcal / h]$$

$$\checkmark \quad H_{S_2V} = Q_{S_2ev} \times (L + C_{p,ev} \times \Delta T_{ev})$$

$$[L] = [kcal / kg] \quad [C_p \cdot \Delta T] = \left[\frac{kcal}{kg \cdot ^\circ C} \cdot ^\circ C \right] = [kcal / kg]$$

$$[H] = \left[\frac{t}{h} \cdot \frac{kcal}{kg} \right] = \left[\frac{t}{h} \cdot \frac{kcal}{10^{-3} \cdot t} \right] = \left[\frac{10^3 \cdot kcal}{h} \right] = [Mcal / h]$$

Annexe 2 : Analyse dimensionnelle du bilan d'énergie du four

$$\checkmark \quad H_{\text{fuel}} = \frac{\text{PCI} \cdot M_{\text{fuel}}}{M_{\text{clinker}}}$$

$$[H_{\text{fuel}}] = \left[\frac{\text{kcal} / \text{kg} \times \text{kg} / \text{h}}{\text{kg} / \text{h}} \right] = [\text{kcal} / \text{kg}]$$

$$\checkmark \quad H = Q_m \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot \frac{1}{Q_{\text{mclinker}}}$$

$$[H] = \left[\frac{\text{kg} / \text{h} \times \text{kcal} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C} \times ^\circ\text{C}}{\text{kg} / \text{h}} \right] = [\text{kcal} / \text{kg}]$$

$$\checkmark \quad HAR = \rho_o \times Q_o \times C_p \times \Delta T \times \frac{1}{Q_{\text{mclinker}}}$$

$$[H] = \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times \text{kcal} / \text{kg} \cdot ^\circ\text{C} \times ^\circ\text{C} \times \frac{1}{\text{kg} / \text{h}} \right] = [\text{kcal} / \text{kg}]$$

$$\checkmark \quad \varphi = \sigma \varepsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4)$$

$$[\varphi] = [W \times m^{-2} \times K^{-4} \times m^2 \times K^4] = [W] = [J / s] = \left[\frac{3600 \text{ .cal}}{4186 \text{ .h}} \right] = [0.86 \cdot 10^{-3} \cdot \text{kcal} / \text{h}] = [\text{kcal} / \text{h}]$$

$$\checkmark \quad RAD = 4 \cdot 10^{-8} \times (T^4 - T_0^4) \times A \times \frac{1}{Q_{\text{mclinker}}}$$

$$[RAD] = \left[4 \cdot 10^{-8} \times 0,86 \cdot 10^{-3} \times \frac{\text{kcal} / \text{h}}{\text{kg} / \text{h}} \right] = [3,44 \cdot 10^{-11} \times \text{kcal} / \text{kg}] = [\text{kcal} / \text{kg}]$$

$$\checkmark \quad CON_{\text{nat}} = 80,33 \times \left(\frac{T + T_0}{2} \right)^{-0,724} \times (T - T_0)^{1,333} \times A \times \frac{1}{Q_{\text{mclinker}}}$$

$$\checkmark \quad Perte = \frac{\text{Valeur_tableau}}{1000} \cdot CSF$$

$$[Perte] = \left[\frac{\text{kcal}}{1000 \text{ kcal}} \times \text{kcal} / \text{kg} \right] = [\text{kcal} / \text{kg}]$$

$$\checkmark \quad H = Q_{\text{eau_libre}} \times \frac{H_{\text{eau_libre_spécifique}}}{Q_{\text{mclinker}}}$$

$$[H] = \left[\frac{\text{kg} / \text{h}}{\text{kg} / \text{h}} \cdot \text{kcal} / \text{kg} \right] = [\text{kcal} / \text{kg}]$$

$$\checkmark \quad Q_{\text{air}} = \rho \times Q = 3600 \times N \times \frac{1}{n^2} \times \eta \times \frac{n_{\text{ref}}^2 \times \rho_{\text{ref}}}{P_{1,\text{ref}}}$$

$$[N] = [W] = [M \times L^2 \times T^{-3}]$$

$$\checkmark \quad [\rho_{ref}] = [M \times L^{-3}] \quad \left[\frac{n_{ref}^2}{n^2} \right] = [cte] \quad [\eta] = [cte]$$

$$[P_{ref}] = [M \times L^{-1} \times T^{-2}]$$

$$\checkmark \quad [Q_{mair}] = [cte] \times \left[3600 \times \frac{M \times L^2 \times T^{-1}}{M \times L^{-1} \times T^{-2}} \times M \times L^{-3} \right] = [M \times T^{-1}] = [kg/h]$$

Annexe 3 déterminations des chaleurs massiques



The International Cement Production Seminar

Encl 6

MEAN SPECIFIC HEATS BETWEEN 0 AND T°C OR 32 AND T°F

$$SpH = A + B \cdot T + 10^{-6} \cdot C \cdot T^2 \cdot 10^{-9} \text{ kcal/kg } ^\circ\text{C}$$

$$SpH = A + B \cdot (T-32) + 10^{-6} \cdot C \cdot (T-32)^2 \cdot 10^{-9} \text{ BTU/lb } ^\circ\text{F}$$

T en °C

	Metric Units			US Units		
	A	B	C	A	B	C
CO ₂	0.196	118	-43	0.196	66	-13.2
H ₂ O	0.443	39	26	0.443	22	6.6
N ₂	0.244	22	0	0.244	12	
O ₂	0.218	30	0	0.218	17	
Air	0.237	23	0	0.237	13	
Raw Meal	0.206	101	-37	0.206	56	-11.4
Clinker	0.186	54	0	0.186	30	
Coal	0.262	390	0	0.262	217	

Heat for evaporation of water at :	0°C	20°C	100°C
	32°C	68°C	212°C
kcal/kg	597	566	539

Annexe 4: caractéristiques du ventilateur 541FN310

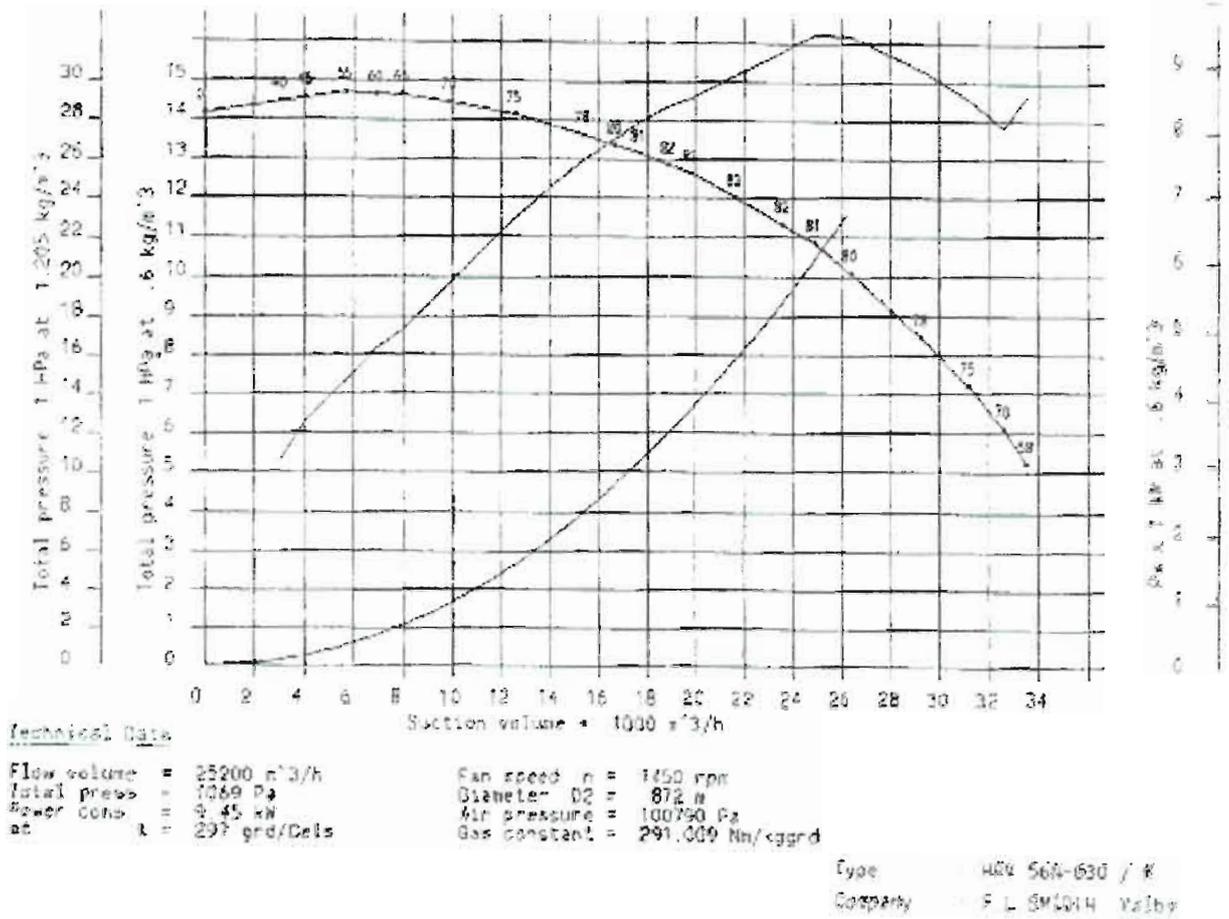
Fan Type: **HRV 56N-630 / K**

System: **Booster Fan**

		Design	Normal		
flow volume	V_1	11858	9148		Nm ³ /h
flow volume	V_2	25200	19440		Dm ³ /h
mass flow	m_1	151120	11664		kg/h
mass flow (dust)	m_{12} 14 g/m ³	353	272		kg/h
flow volume	V_2	25200	19440		Dm ³ /h
stat. diff. pressure	$\Delta p_{st} 1-2$	-1265 / -196	-1265 / -196		Pa
dyn. diff. pressure	$\Delta p_{dyn} 1-2$				Pa
stat. loss ()	$\Delta p_{st} 1-E$				Pa
stat. loss ()	$\Delta p_{st} A-2$				Pa
total pressure	$\Delta p_{st} E-A$	1069	1069		Pa
total pressure	$\Delta p_{st} (\rho = 1,205)$	2147	2147		Pa
density	$\rho_1 (0 \text{ } ^\circ\text{C})$	1,275	1,275		kg/m ³
density	$\rho_1 (t \text{ } ^\circ\text{C})$	0,600	0,600		kg/m ³
density	$\rho_2 (t \text{ } ^\circ\text{C})$	0,600	0,600		kg/m ³
density	$\rho_2 (t \text{ } ^\circ\text{C})$	0,604	0,604		kg/m ³
gas constant	R	291,009	291,009		Nm/kg ³ K
barometric pressure	p_b	100790	100790		Pa
temperature	t	297	297	mach. 450	°C
power consum.(shaft)	P (t °C)	9,5	7,1		kW
power consum.(shaft)	P (°C)				kW
fan speed	n_v	1450	1354		1/min
efficiency	η	80,8	83,7		%
specific flow work	Y_1	1775	1775		Nm/kg
effective power	$P_{N_{eff}}$	7,7	5,9		kW
tip speed	u_2	66,2	61,8		m/s
inertia moment	J_1	18,0	18,0		kgm ²
impeller diameter	D_2	0,872	0,872		m

Technical design

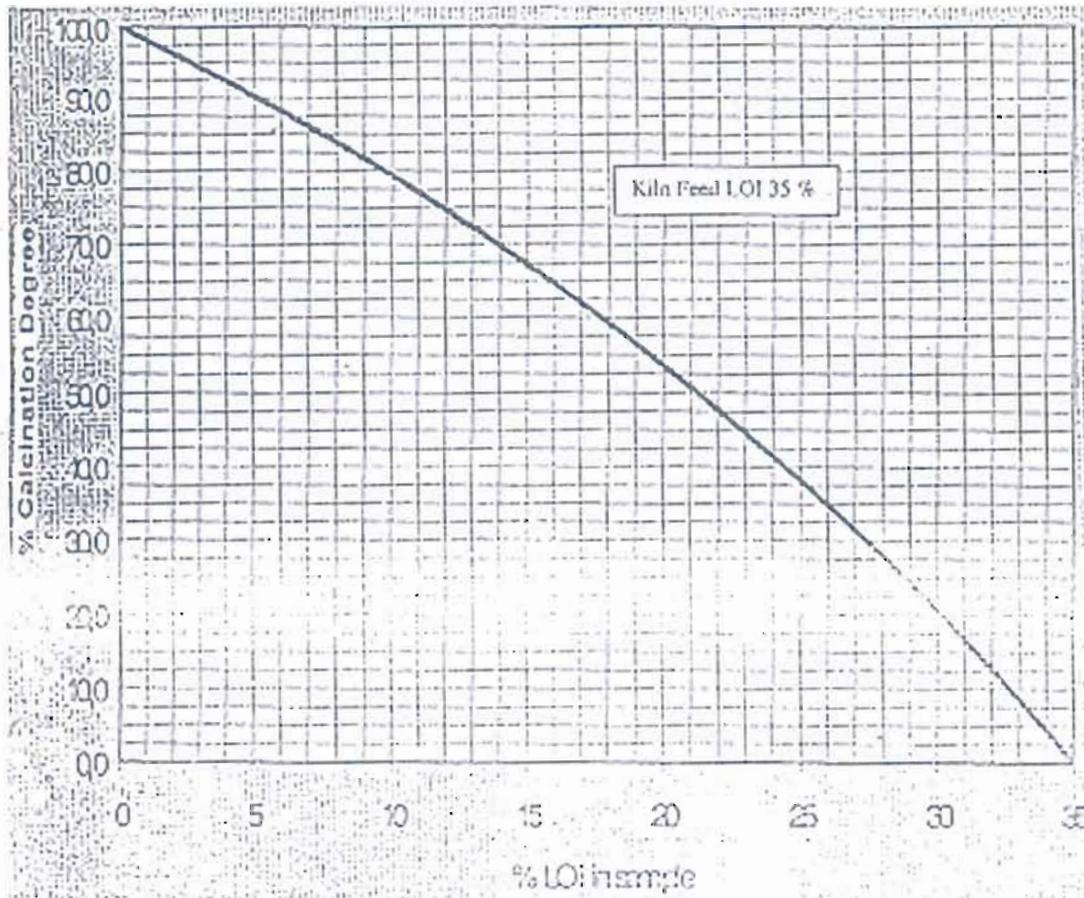
Annexe 5 courbes caracteristiques du ventilateur 541 FN 310



Annexe 6: détermination du degré de calcination à partir de la perte au feu

	Clinkerisation	Page
	Calcination degree	B-5

Calcination Degree determined by Loss On Ignition (LOI)



The calcination degree is determined by LOI (loss on ignition) as an approximate value, as other materials other than CO_2 vanish during ignition. To reduce the influence of alkalis, sulphur etc. the LOI should be measured at 950 °C. The measured calcination degree of the hot meal from the dust cyclone is influenced by the dust recirculation from the kiln. A high dust recirculation will result in a higher apparent degree of calcination.

Annexe 7 Appareils de mesure utilisés pour le bilan du broyage ciment

Appareils	Nom	Utilisations
	Thermocouple type K (0 à 1200°C)	Mesure de la température de matières (clinker, calcaire et gypse) et aussi d'adjuvants
	pyromètre infrarouge	Mesure de la température de la virole du broyeur ciment
	Anémomètre à hélice	Mesure de la vitesse du vent (vitesse de l'air frais) et détermine le type de convection (naturelle et forcée)