

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP



Gm. 0535

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

Centre de Thiès

DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur de Conception

Thème :

**Conception d'un moteur de calcul automatisé pour
l'optimisation de la récupération d'énergie thermique
au niveau du refroidisseur clinker**

Application : Les Ciments Du Sahel

Auteur : Mouhamed NDIAYE

Directeur Interne : Dr. Salif GAYE, Professeur à l'EST

Directeur Externe : MScA, Ing. Oumar DIALLO, Chef Département Production CDS

Année Universitaire ; 2008-2009

SOMMAIRE

L'Ecole Supérieure Polytechnique est une école de formation qui a pour vocation de former des ingénieurs et des techniciens supérieurs en Génie Civil et en Génie Electromécanique. Dans le cadre de la formation des ingénieurs de conception, l'élève ingénieur est appelé à rédiger, durant sa fin de formation, un document appelé projet de fin d'étude.

En effet, le projet de fin d'étude est un sujet de recherche ou d'entreprise sur lequel l'élève ingénieur doit travailler sous l'encadrement de professeurs de l'école et des professionnels de l'entreprise pour apporter des solutions concrètes à des problèmes précis.

Ainsi, les Ciments Du Sahel qui est une cimenterie basée à Kirène, constitue un potentiel partenaire de l'école dans ce domaine car depuis trois ans ils ne cessent de formuler des sujets d'amélioration au sein de leur entreprise en des sujets de projets de fin d'études qu'ils proposent aux élèves ingénieurs en formation à l'école.

Pour cette année, le sujet qu'ils proposent s'intitule comme suit :

« Conception d'un moteur de calcul automatisé pour l'optimisation de la récupération d'énergie thermique au niveau du refroidisseur. »

En fait les conclusions de cette étude permettraient à l'entreprise de procéder à l'optimisation de la récupération de l'énergie thermique au niveau du refroidisseur.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX	i
LISTE DES FIGURES	ii
NOMENCLATURE	iii
LISTE DES ANNEXES	iv
INTRODUCTION	0
PREMIERE PARTIE :LES CIMENTS DU SAHEL.....	1
INTRODUCTION.....	2
CHAPITRE 1 : FONCTIONNEMENT DE LA CIMENTERIE	3
1.1 Définition	3
1.2 Composition d'une cimenterie	3
1.3 Description du processus de fabrication du clinker.....	5
1.3.1 Exploitation minière	5
1.3.2 Concassage	5
1.3.3 Pré-homogénéisation et stockage	5
1.3.4 Broyage cru et homogénéisation	5
1.3.5 Cuisson.....	6
1.3.6 Broyage ciment	6
1.3.7 Ensachage- Expédition	6
1.3.8 Principe chimique de la fabrication du clinker.....	6
CHAPITRE 2 : PRELEMINAIRE	8
2.1 Etude de la supervision.....	8
2.2 Familiarisation avec la ligne cuisson	8
2.3 Méthodes de mesure sur site et calculs.....	8
2.3.1 Vitesse	9
2.3.2 Pression.....	9
2.3.3 Débit.....	9
2.3.4 Température.....	9
2.3.5 Echantillonnage	9
2.3.6 Granulométrie.....	10
CONCLUSION	11
DEUXIEME PARTIE :ETUDE DU FONCTIONNEMENT DU REFROIDISSEUR	12
INTRODUCTION.....	13
CHAPITRE 1 : REFROIDISSEMENT DU CLINKER	14
1.1 Fonctionnement mécanique du refroidisseur	14
1.1.1 Compartiment CIS-ADP	15

1.1.2	Compartiment à barres transversales	15
1.1.3	Régulateurs mécaniques de débits	16
1.2	Théorie du refroidissement	17
1.2.1	Epaisseur de la couche de clinker	17
1.2.2	Vitesse de l'air et échange de chaleur	18
1.2.3	Granulométrie et échange de chaleur	18
1.2.4	Modes d'échanges de chaleur	18
1.2.4.1	Transmission de chaleur	18
1.2.4.2	Conduction de chaleur	19
1.2.5	Vitesse de l'air et granulométrie	19
CHAPITRE 2 : BILANS THERMIQUES DU REFROIDISSEUR		20
2.1	Définition	20
2.2	Paramètres du refroidisseur	21
2.3	Calcul de rendement	22
2.4	Sources de paramètres	24
3.1	Campagne de mesure	25
3.2	Mesure et calcul de débit	27
3.3	Boucles de régulation	29
3.3.1	Régulation des ventilateurs de refroidissement	29
3.3.2	Régulation des grilles du refroidisseur	30
CONCLUSION		31
TROISIEME PARTIE :DIAGNOSTIC DES PERFORMANCES DU REFROIDISSEUR ET OPTIMISATION		32
INTRODUCTION		33
CHAPITRE 1 : PARAMETRES ET METHODES DE MESURE.....		34
1.1	Les ventilateurs de soufflage	34
1.1.1	Prédisposition pour le mesurage	34
1.1.2	Température ambiante.....	34
1.1.3	Pression dynamique.....	35
1.1.4	Pression statique	35
1.1.5	Vitesse d'aspiration	35
1.2	Température sortie refroidisseur.....	36
1.3	Température du casing du refroidisseur.....	36
CHAPITRE 2 : EXPERIMENTATION		37
2.1	Refroidisseur Cross bar SF 2 X 3 F.....	37
2.1.1	Paramètres standards du refroidisseur SF 2 X 3 F.....	37
2.1.2	Comparaison avec les autres types de refroidisseur.....	38

2.2	Principe de l'expérimentation	39
2.3	Série de mesure	40
2.3.1	Série N°1	40
2.3.2	Série N°2	42
2.3.3	Série N°3	43
2.3.4	Série N°4	45
2.3.5	Série N°5	47
2.3.6	Série N°6	49
2.3.7	Série N°7	51
2.4	Tableau récapitulatif des paramètres du refroidisseur	53
2.5	Courbes de tendances	54
2.5.1	Courbes de granulométrie	54
2.5.2.1	Courbe de la granulométrie G1 :	55
2.5.2.2	Courbe de la granulométrie G2 :	55
2.5.2.3	Courbe de la granulométrie G4 :	56
2.5.2.4	Courbe de la granulométrie G5 :	56
2.5.2.5	Courbe de la granulométrie G6 :	57
2.5.2.6	Courbe de la granulométrie G7 :	57
2.6	Interprétation des expériences	58
2.6.1	Ratio Grille	58
2.6.2	Pression Capot de chauffe.....	58
2.6.3	Ratio Air	59
2.7	Simulation de gain sur la consommation du charbon	59
CHAPITRE 3 : CONCEPTION DU MOTEUR DE CALCUL AUTOMATISE		60
3.1	Introduction de Visual Basic sous Excel	60
3.1.1	Historique de VBA.....	60
3.1.2	Différence entre Visual Basic et VBA	60
3.1.3	Guide d'utilisation du moteur de calcul	61
CONCLUSION		64
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS		65
REFERENCES		66
ANNEXES		000

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Ma feu Grand-mère

Fatou FALL

Qui nous a quitté au cours de cette année

Que la terre lui soit légère !

Remerciements

Nous tenons à remercier tous ceux qui ont eu, de manière directe ou indirecte, à l'élaboration de ce modeste document. A cet effet nous tenons à remercier particulièrement :

- ✚ La Direction de l'Ecole Polytechnique de Thiès
 - M. Ibrahima Khalil CISSE, Directeur de l'EPT pour sa participation à la correction du document.
 - Toute l'administration et le corps professoral de l'Ecole
- ✚ La Direction des Ciments Du Sahel pour nous avoir permis de réaliser le projet au sein de leur entreprise.
 - M. Michel LAYOUSSE, Directeur Général adjoint des Ciments Du Sahel.
 - M. Mamadou NDIAYE, Directeur d'Exploitation des Ciments Du Sahel.
 - M. Salam THIOUNE, Directeur d'Exploitation adjoint des Ciments Du Sahel.
- ✚ Nos Directeurs de projet.
 - M. Oumar DIALLO, Chef de Département Production et Contrôle Commande des Ciments Du Sahel pour toute sa rigueur, sa pertinence et son parfait encadrement.
 - M. Salif GAYE, Enseignant à l'EPT pour ses conseils et de sa disponibilité.
- ✚ A toutes ces personnes :
 - M. Bachir LO, Chef de service Laboratoire physique des Ciments Du Sahel pour sa disponibilité.
 - Messieurs Victor D. NDIONE et Diomaye NIANE, de la documentation.
 - M. Oumar NIANG, Enseignant à l'EPT pour l'intérêt qu'il a porté à ce sujet.
 - M. Ataba SAMBOU, pour son aide précieux à la bonne conclusion du projet
 - Messieurs les opérateurs de la salle de commande.
 - Tout le corps professoral de l'Ecole Polytechnique de Thiès.
 - Tout le personnel administratif et technique de service.
 - Tout le personnel du COUD.
 - Tous les élèves ingénieurs et techniciens de l'Ecole Polytechnique de Thiès.
 - Nos camarades de promo de la DIC3.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Sources de paramètres	25
Tableau 2 : Campagne de mesure	27
Tableau 3: Hypothèses de la série de mesure N°1	40
Tableau 4 : Résultats de la série de mesure N°1	41
Tableau 5: Hypothèses de la série de mesure N°2	42
Tableau 6: Résultats de la série de mesure N°2	43
Tableau 7 : Hypothèses de la série de mesure N°3	44
Tableau 8 : Résultats de la série de mesure N°3	44
Tableau 9: Hypothèses de la série de mesure N°4	45
Tableau 10: Résultats de la série de mesure N°4	46
Tableau 11: Hypothèses de la série de mesure N°5	47
Tableau 12: Résultats de la série de mesure N°5	48
Tableau 13 : Hypothèses de la série de mesure N°6	49
Tableau 14: Résultats de la série de mesure N°6	50
Tableau 15 : Hypothèses de la série de mesure N°7	51
Tableau 16: Résultats de la série de mesure N°7	52
Tableau 17 : Récapitulatif des paramètres du refroidisseur	53

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Process complet d'une cimenterie	4
Figure 2 : Processus chimique de fabrication du clinker	7
Figure 3 : vue en coupe d'un refroidisseur à grille.....	14
Figure 4 : flux d'énergie au niveau du refroidisseur	20
Figure 5 : Boucle de régulation des ventilateurs du refroidisseur	29
Figure 6 : boucle de régulation des grilles du refroidisseur	30
Figure 7 : Courbes de granulométrie des différentes mesures	54
Figure 8 : Paramètres du refroidisseur pour la granulométrie G1	55
Figure 9 : Paramètres du refroidisseur pour la granulométrie G2	55
Figure 10 : Paramètres du refroidisseur pour la granulométrie G4	56
Figure 11 : Paramètres du refroidisseur pour la granulométrie G5	56
Figure 12 : Paramètres du refroidisseur pour la granulométrie G6	57
Figure 13 : Paramètres du refroidisseur pour la granulométrie G7	57
Figure 14 : Synoptique de la page principale	62
Figure 15: Synoptique de la page de saisie des paramètres	63
Figure 16: Synoptique de la vue d'ensemble du refroidisseur	63

NOMENCLATURE

CDS	:	Ciments Du Sahel
LOI	:	Lost On Ignition
CFG	:	Grille à Flux Contrôlé
MFR	:	Mecanic Flow Regulator (Régulateur mécanique de débit)
ADP	:	Plaque de Diffusion d'Air
CIS	:	Système à Impact Contrôlé
UGC	:	Compartiment Sous la Grille
PFE	:	Projet de Fin d'Etudes
MA	:	Module Alumine
MS	:	Module Silicique
LSF	:	Limite de Saturation à chaux
Clk	:	Clinker

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 : Fiche de mesure	b
Annexe 2 : Rapport du test de granulométrie du laboratoire	c
Annexe 3 : Rapport des paramètres du refroidisseur sur le logiciel Plant Guide.....	d
Annexe 4 : Boucle de Régulation des vitesses des grilles.....	e
Annexe 5 : Boucle de régulation des ventilateurs de refroidissement	f
Annexe 6 : Synoptique du refroidisseur	g
Annexe 7 : Page de saisie des paramètres du refroidisseur du moteur de calcul	h
Annexe 8 : Paramètres du refroidisseur et flux d'énergie	i
Annexe 9 : Page principale du moteur de calcul	j
Annexe 10 : Programme de la page saisie du moteur de calcul	k
Annexe 11 : Programme de la page du refroidisseur et flux d'énergie	l
Annexe 12 : Programme de la page principale du moteur de calcul.....	m
Annexe 13 : Programme des boîtes de dialogue du moteur de calcul.....	n

INTRODUCTION

Dans ce monde secoué par la crise énergétique et face à l'offre insuffisante par rapport à la demande accrue de nos pays, il importe que toutes les entreprises puissent procéder à une bonne maîtrise de leur consommation énergétique. Ceci, d'une part pour diminuer la consommation énergétique qui est synonyme de gain de profit pour l'entreprise et d'autre part pour soulager la demande. Pour cela, les entreprises doivent nécessairement optimiser les conditions de fonctionnement de leurs équipements respectifs assurant ainsi un rendement optimal pour ces derniers. C'est la raison pour laquelle Les Ciments Du Sahel nous ont proposé ce sujet qui consiste à optimiser la récupération d'énergie thermique au niveau de leur refroidisseur clinker ; ce qui implique systématiquement une diminution de la consommation du charbon. En outre de cette diminution de la consommation du charbon, ce sujet permet aussi de maîtriser davantage les conditions de marche du refroidisseur occasionnant un meilleur ajustement des paramètres face aux différents comportements du refroidisseur.

Pour mieux aborder ce sujet, nous allons d'abord voir en première partie le fonctionnement de la cimenterie en expliquant dans les deux chapitres qui la composent le processus de fabrication du ciment et les préliminaires dont nous devons disposer pour travailler sur le refroidisseur. Ensuite nous verrons dans la deuxième partie, à travers ses trois chapitres, l'étude du fonctionnement du refroidisseur tout en évoquant les bilans thermiques du refroidisseur et les notions d'instrumentations. Enfin, dans les trois chapitres de la troisième partie, nous procéderons au diagnostic des performances du refroidisseur et à la conception du moteur de calcul automatisé.

PREMIERE PARTIE : LES CIMENTS DU SAHEL

INTRODUCTION

Les Ciments Du sahel est une cimenterie dotée d'un process complet d'une capacité de 600 000 tonnes de clinker par an. Ce process prend sa source depuis l'exploitation minière jusqu'à l'Ensachage Expédition en passant par la ligne cuisson et le broyage ciment. Avec son projet d'extension en cours d'une ligne dont la capacité productive double l'actuel ligne, les Ciments Du Sahel serait dans les dispositions à couvrir une bonne partie du marché du ciment aussi bien au niveau national qu'au niveau de la sous région.

Ses équipements pilotés avec des technologies de dernières générations ajoutées aux outils de production et de maintenance sur place lui confèrent le statut d'entreprise moderne.

Dans cette partie du projet nous aborderons d'abord le fonctionnement de la cimenterie en premier chapitre. A ce niveau nous allons décrire le processus de fabrication du ciment partant de l'exploitation minière jusqu'à l'ensachage expédition. En deuxième chapitre nous parlerons des préliminaires sur les différents paramètres du refroidisseur.

CHAPITRE 1 : FONCTIONNEMENT DE LA CIMENTERIE

1.1 Définition

Le ciment, terme provenant du mot latin caementum signifiant pierre non taillée, est une matière pulvérulente formant avec l'eau ou avec une solution saline une pâte plastique liante, capable d'agglomérer avec une très grande résistance en durcissant, des substances variées.

C'est une gangue hydraulique durcissant rapidement et atteignant en peu de jours sa résistance maximale. Ainsi, après durcissement, cette pâte conserve sa résistance et sa stabilité. La terminologie du mot ciment peut aussi signifier :

- La chaux commune
- Le plâtre
- La pouzzolane
- Le ciment prompt
- Le ciment portland

1.2 Composition d'une cimenterie

Il existe trois types de process pour une cimenterie. Cette catégorisation est liée à son autonomie et à son potentiel de production.

✓ Process complet :

C'est une chaîne de production qui prend sa source depuis l'exploitation minière. Dans ce type de process, l'exploitation assure sur elle-même toutes les phases de production du ciment et du clinker assurant ainsi le concassage, le broyage de la farine crue, la cuisson, le broyage du ciment, l'ensachage et l'expédition.

✓ Station de broyage :

Elle dérive du process complet. Dans ce cas de figure les éléments constitutifs du ciment tel que le clinker sont importés au lieu d'être produits sur site. Il s'étend du broyage ciment jusqu'à l'expédition passant par l'ensachage.

✓ Station d'ensachage :

Elle consiste essentiellement à l'ensachage et l'expédition à partir d'un approvisionnement de ciment en vrac. En d'autre terme elle consiste juste à la commercialisation du ciment importé.

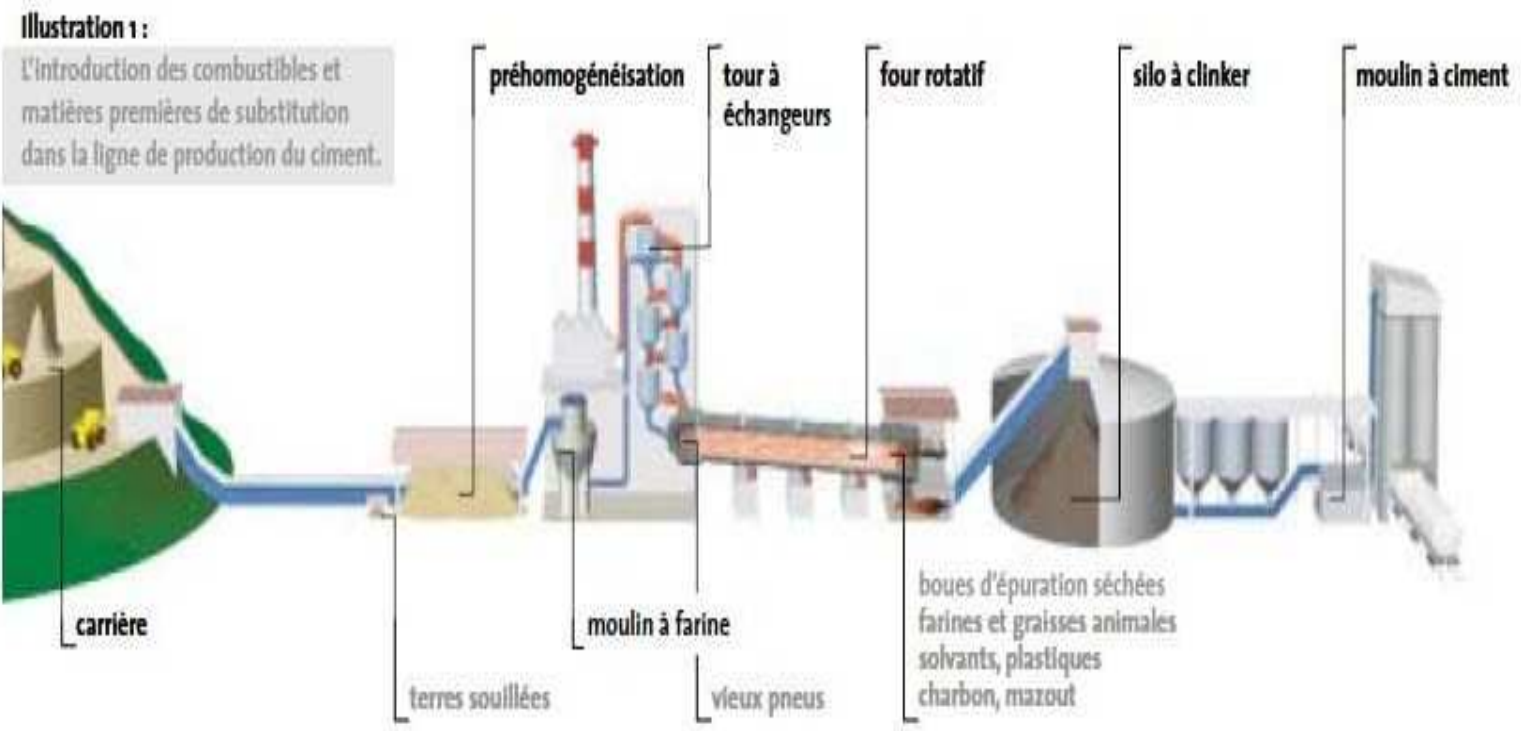


Figure 1: Process complet d'une cimenterie

1.3 Description du processus de fabrication du clinker

1.3.1 Exploitation minière

Elle constitue l'étape où on effectue l'extraction du minerai à l'aide de pelles mécaniques après abattage à l'explosif. Cependant des investigations préliminaires doivent être effectuées au préalable pour déterminer l'iso teneur qui permet d'évaluer les couches de matière. Ainsi pour certaines coordonnées (x, y, z) du domaine d'exploitation nous devons connaître la composition chimique.

1.3.2 Concassage

Tout le minerai extrait de la carrière sous forme de gros blocs de pierres est acheminé à ce niveau pour subir une réduction de la taille. Ainsi son objectif consiste à réduire la granulométrie de la matière jusqu'à l'ordre de 25mm.

1.3.3 Pré-homogénéisation et stockage

A la sortie du concasseur, certaines matières comme le gypse, le calcaire et la latérite sont directement acheminés au niveau des hall d'ajouts qui seront par la suite acheminées vers les trémies d'ajouts du broyeur ciment ou du broyeur cru suivant les besoins. Cependant une bonne partie constituée d'un mélange de calcaire et d'argile sera acheminée vers un hall de pré-homogénéisation de farine crue. Il faut noter que des informations sont obtenues sur ces matières avant leur mélange par le biais de l'analyseur à rayons GAMMA. Le mélange consiste à d'abord superposer les matières pour ensuite les gratter suivant un plan orthogonal à celui de la superposition. A la sortie du pré-homo le mélange est stocké dans les silos d'ajouts.

1.3.4 Broyage cru et homogénéisation

A partir des trémies d'ajouts les matières, suivant des proportions assurées par des doseurs pondérales, sont envoyées via un convoyeur à bande au niveau du broyeur cru pour être transformées en poudre appelée farine crue. Cette farine est par la suite stockée dans un silo à travers duquel elle subit une autre homogénéisation pour assurer un approvisionnement chimiquement homogène du four en farine crue.

1.3.5 Cuisson

C'est à partir de cette étape qu'on assiste à la production du clinker proprement dite. En effet le four est alimenté à partir de la tour échangeur. Celle-ci permet à la farine crue de gagner beaucoup de chaleur avant d'entrer dans le four. Aussi c'est à partir de ce gain de chaleur qu'on assiste au phénomène de décarbonatation à la température de 850°C. Au bout de cette tour échangeur la farine aura gagné assez de chaleur pour entrer dans le four où elle peut atteindre des températures allant jusqu'à 1400°C. A la sortie du four on obtient un produit granulé appelé clinker. Le clinker subit un refroidissement pour atteindre des températures de l'ordre de 60°C au dessus de l'ambiance.

1.3.6 Broyage ciment

A partir du clinker produit et des matières provenant de la hall des ajouts on effectue un mélange suivant des proportions assurées par les doseurs qu'on envoie par la suite au broyeur pour être réduit en poudre. Le type de broyeur est un broyeur à boulets dans lequel on a deux compartiments remplis de boulets de diamètres différents qui assurent le broyage du mélange de clinker, de gypse et d'éventuels ajouts suivant le type de ciment voulu. A la sortie du broyeur, le produit passe dans un séparateur où on effectue une sorte de tamisage par effet centrifuge permettant de séparer la fine poussière (ciment) et les grains qui vont être réintroduits dans le broyeur. La poussière qui sort du séparateur est récupérée par des cyclones puis envoyée vers les silos de stockage.

1.3.7 Ensachage- Expédition

A partir des silos de stockage on extrait le ciment qui passe par les ensacheuses à travers lesquelles on procède à la mise en sac du ciment. Ensuite ces sacs sont transportés par des convoyeurs jusqu'aux camions pour leur livraison. A partir de l'extraction au niveau des silos on peut livrer du ciment en vrac directement aux camions.

1.3.8 Principe chimique de la fabrication du clinker

Le clinker est le composant principal du ciment avec un taux de présence allant jusqu'à 95%. Il est obtenu par cuisson de la farine crue broyée très finement à 1450°C. Sa capacité de production constitue par ailleurs le critère principal d'évaluation de la performance d'une cimenterie. Les installations qui assurent la fabrication du clinker sont entre autres la tour

échangeur, le four proprement dit, le refroidisseur, les systèmes de transport et les organes annexes.

Le clinker se compose essentiellement des quatre phases principales suivantes : C3S ; C2S ; C3A ; C4AF. Les minéraux sont constitués par les quatre oxydes principaux du clinker à ciment. Cette composition peut se résumer de la manière suivante :

- ✚ C3S = 3CaO, SiO₂ : 50 à 60%
- ✚ C2S = 2CaO, SiO₂ : env. 20%
- ✚ C3A = 3CaO, Al₂O₃ : 5 à 10%
- ✚ C4AF = 4CaO, Al₂O₃, Fe₂O₃ : env. 10%
- ✚ CaO : 1 à 2.5%
- ✚ CaSO₄
- ✚ SO₃
- ✚ Eléments secondaires: P₂O₅ ; Cl ; MgO ; Na₂O ; K₂O ; etc.

Les éléments de base sont : CaO = **C** ; Al₂O₃ = **A** ; Fe₂O₃ = **F** ; SiO₂ = **S**.

Au niveau de la tour échangeur on a la réaction de décarbonatation qui consiste à libérer le dioxyde de carbone (CO₂) par apport de chaleur.

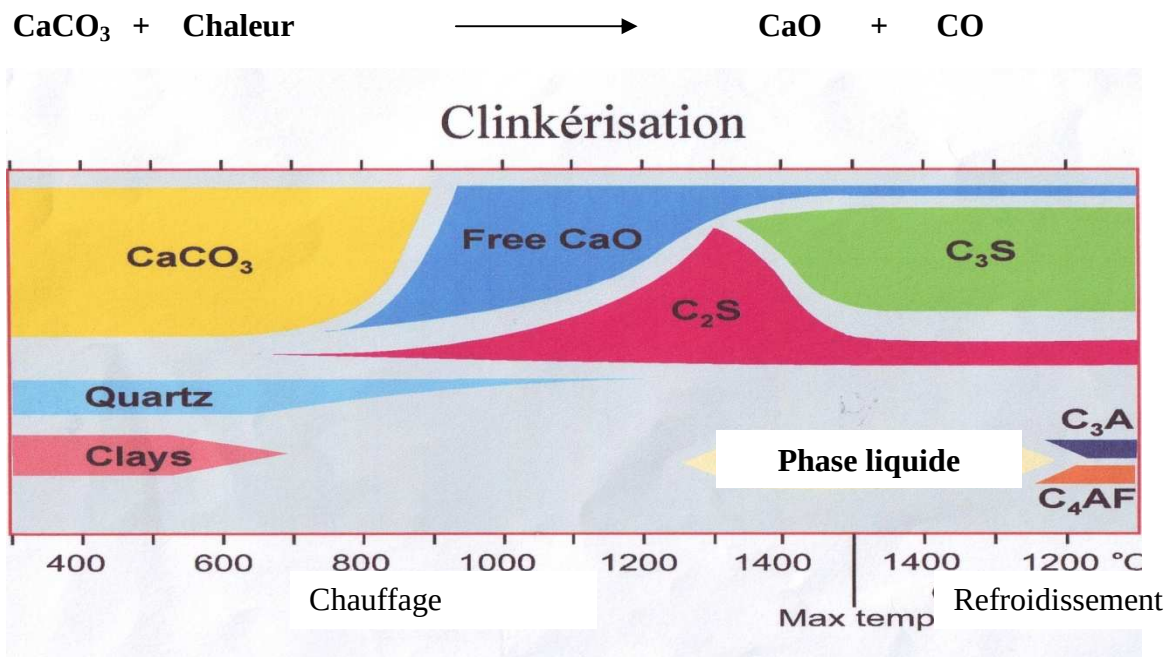


Figure 2 : Processus chimique de fabrication du clinker

CHAPITRE 2 : PRELEMINAIRE

2.1 Etude de la supervision

La supervision s'effectue au niveau de la salle de commande. Toutes les informations nécessaires au bon fonctionnement sont disponibles au niveau de la salle de commande via des écrans d'ordinateurs. Ainsi les opérateurs peuvent lire ou agir sur les paramètres affichés à l'écran afin d'assurer de manière permanente le bon fonctionnement du process.

Dans ce cas on peut avoir les informations suivantes :

- ✓ Pression au niveau du refroidisseur.
- ✓ Pression des vérins des grilles.
- ✓ Vitesse des grilles.
- ✓ Dépression au niveau du four.
- ✓ Débits des ventilateurs.
- ✓ Température au niveau des grilles.
- ✓ Pression des ventilateurs.

C'est au niveau de la supervision que l'on fixe les valeurs des consignes. Par ailleurs on arrive à stabiliser le fonctionnement du process en agissant le plus souvent sur ces paramètres de marche.

2.2 Familiarisation avec la ligne cuisson

Cette familiarisation consiste à mieux comprendre le processus de fabrication du clinker depuis l'introduction de la farine crue jusqu'à la sortie du clinker au niveau refroidisseur. Cela nous a amené à avoir un bref aperçu sur les paramètres de fonctionnement tels que les valeurs de consigne, les plages, les valeurs habituelles utilisées etc.

2.3 Méthodes de mesure sur site et calculs

Dans le cadre du projet qui consiste à optimiser la récupération d'énergie thermique, nous aurons à effectuer beaucoup de mesures sur site et à établir beaucoup d'équations. Ceci nous

oblige à comprendre les appareils de mesure et leur mode d'utilisation ainsi que les calculs éventuels à effectuer.

2.3.1 Vitesse

Ce paramètre est mesuré par un appareil appelé anémomètre. La mesure consiste à placer l'appareil perpendiculairement au sens d'écoulement de flux. Ainsi à partir d'un écran on a une lecture numérique de la valeur mesurée. Dans le cadre du projet, on aura effectué des mesures de vitesses au niveau des aspirations des ventilateurs de soufflage du refroidisseur.

2.3.2 Pression

Ce paramètre est mesuré par un tube de Pitot. Cet appareil nous permet de mesurer précisément la pression dynamique qui nous permet à son tour de calculer la vitesse à partir de la formule suivante. Ce même appareil nous permet de mesurer la pression statique en agissant sur les flexible de raccordement de l'appareil (brancher sur le moins (-) et sur l'appareil).

$$V = \sqrt{\frac{2gP_d}{\rho_0 \cdot \frac{273}{273+t} \cdot \frac{10333b/b_0 + P_s}{10333}}} \quad 1.1$$

2.3.3 Débit

Il est obtenu à partir de la vitesse mesurée ou calculée par les méthodes citées ci-haut. Dans le cadre du projet on aura besoin des débits des ventilateurs de soufflage du refroidisseur.

2.3.4 Température

Ce paramètre est obtenu par le biais d'un thermocouple de type K exposé aux endroits dont on veut déterminer la température.

2.3.5 Echantillonnage

Une prise d'échantillon est effectuée au niveau de la sortie du refroidisseur. Elle est effectuée par un agent du laboratoire. Cette opération consiste à :

-  Prendre l'échantillon avec le matériel adéquat.
-  Tamiser le produit et séparer les particules incuits (couleur blanche).

- ✚ Faire la mesure du poids au litre avec le pot de 544g de masse.
- ✚ Broyer d'une partie de l'échantillon pour les tests du laboratoire chimie.
- ✚ Conserver une partie pour des besoins ultérieurs.
- ✚ Réserver une partie pour la moyenne journalière.

Une autre prise d'échantillon est effectuée pour les températures.

Cette opération consiste à :

- ✚ Prendre la température ambiante à partir de l'aspiration de l'un des quatre ventilateurs de soufflage.
- ✚ Prendre l'échantillon de la même manière que précédemment.
- ✚ Mesurer la température de cet échantillon à partir de trois endroits différents au niveau du seau donnant T1, T2 et T3.
- ✚ Remplir la fiche de prise d'échantillon.

2.3.6 Granulométrie

Le test de granulométrie est effectué en procédant de la manière suivante :

- ✚ Effectuer une prise d'échantillon au niveau du silo incuit.
- ✚ Mesurer la température de l'échantillon (moyenne de T1, T2 et T3).
- ✚ Peser l'échantillon en prenant en compte la masse du seau (1.27kg).
- ✚ Tamiser l'échantillon :
 - Tamis 25 mm Peser la masse qui donne P1
 - Tamis 16 mm Peser la masse qui donne P2
 - Tamis 7 mm Peser la masse qui donne P3
 - Tamis 5 mm Peser la masse qui donne P4
 - Restant Peser la masse qui donne P5
- ✚ Déterminer le poids au litre de la même manière que précédemment.
- ✚ Remplir la fiche du test en y reportant tous ces résultats

CONCLUSION

Au terme de cette première partie nous pouvons retenir que les Ciments Du Sahel jouissent d'une ligne de production complète renfermant des équipements plus ou moins complexes et qui doivent faire l'objet d'une bonne maîtrise afin de pouvoir optimiser le rendement du process. Pour cela, nous avons pu, dans cette partie, prendre connaissance des pré requis nécessaires pour atteindre notre objectif.

Ainsi, à l'issue de cette première partie on est en mesure d'aborder les calculs de rendement du refroidisseur qui fait l'objet de la deuxième partie du projet.

DEUXIEME PARTIE :

ETUDE DU FONCTIONNEMENT DU REFROIDISSEUR

INTRODUCTION

Le refroidisseur Cross Bar SF 2 X 3 F qui fait l'objet d'étude de ce projet est un équipement essentiel et important au niveau de la ligne de production des Ciments Du Sahel. A ce niveau du process, s'opèrent d'importants bilans énergétiques ayant des impacts directs sur le niveau de consommation du charbon qui est utilisé ici comme combustible.

Ainsi, une bonne maîtrise des paramètres de marche de cet équipement occasionnerait un gain potentiel sur la consommation du charbon.

Dans cette partie nous aborderons dans un premier temps le fonctionnement du refroidisseur et les théories de refroidissement du clinker au niveau du chapitre 1. Ensuite nous parlerons des bilans thermiques dans le chapitre 2 avant de terminer au chapitre 3 avec les outils d'instrumentation.

CHAPITRE 1 : REFROIDISSEMENT DU CLINKER

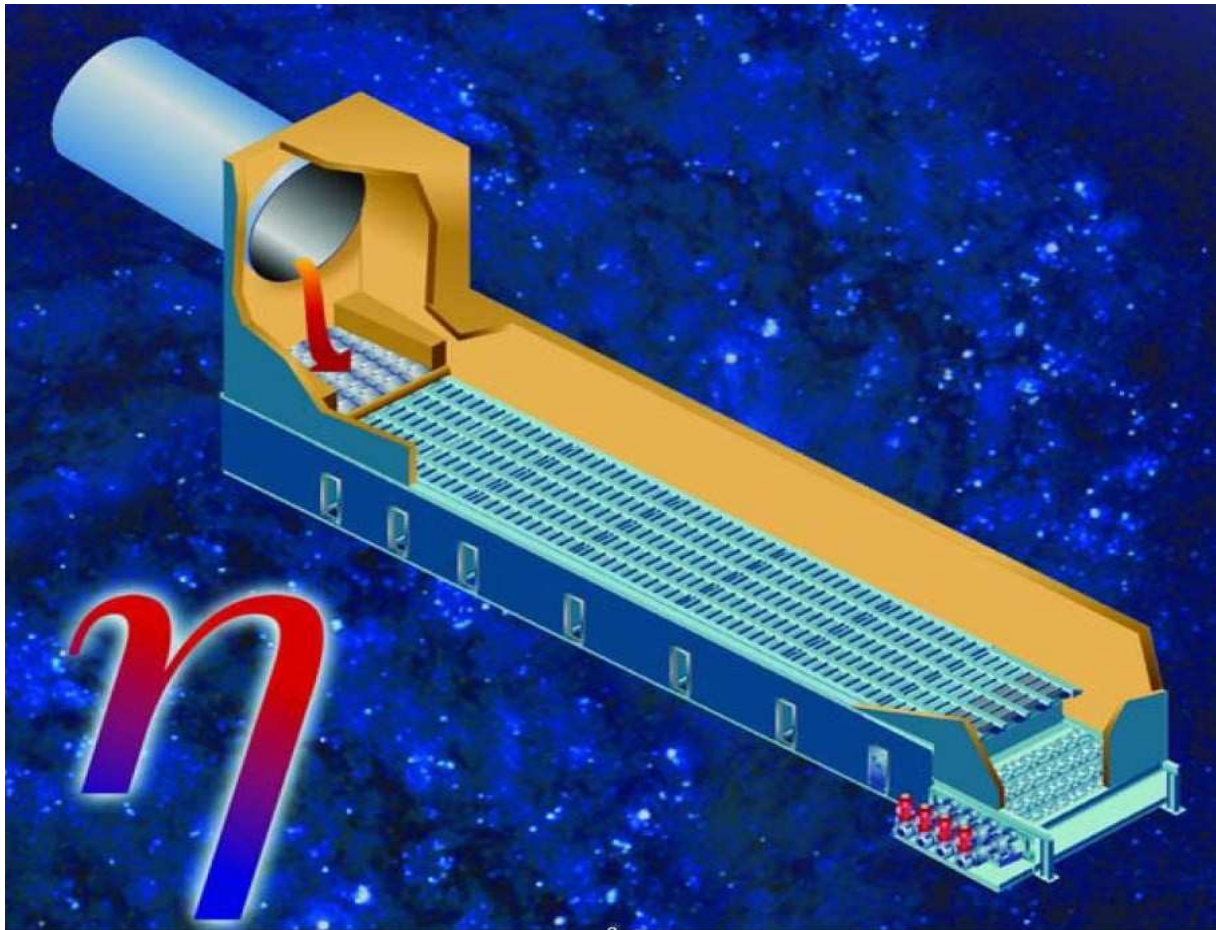


Figure 3 : vue en coupe d'un refroidisseur à grille

1.1 Fonctionnement mécanique du refroidisseur

Le refroidisseur qui fait l'objet de notre étude est du type Refroidisseur à grille **SF 2x3 F**. Il a une capacité de production de 1700t/24h. Il joue un double rôle qui combine la fonction de refroidissement et la fonction de transport. Il est composé de quatre compartiments : un compartiment fixe CIS-ADP et trois compartiments mobiles à barres transversales à 2 colonnes. Avec le système de grille, on peut refroidir le clinker de 1450°C à 65°C au dessus de la température ambiante. L'efficacité théorique du refroidisseur est telle que 85% de l'énergie thermique sont récupérées. Le transport du clinker est assuré par transmission hydraulique par l'intermédiaire de barres transversales. Le refroidissement du clinker est assuré par quatre (4) ventilateurs. Ces ventilateurs fournissent de l'air pour les compartiments situés en dessous de la grille (UGC). Depuis les UGC, l'air traverse les MFR (régulateur mécanique de débit) ensuite les plaques de la grille (ADP) pour finalement atteindre la couche de clinker.

Le refroidisseur est composé de modules. Chaque module est composé de 4 ADP (plaque de diffusion de l'air) sur sa largeur et 5 ADP sur sa longueur. Ces modules sont positionnés cote à cote les uns des autres.

1.1.1 Compartiment CIS-ADP

Le compartiment CIS-ADP comprend 8 ADP sur sa largeur et 5 rangées sur la longueur. Ces 5 rangées sont disposées en escalier et forment un angle de 15° par rapport à l'horizontale. Un canon à air sert à ramener les poussières obstruant le four dans le refroidisseur. Il permet le déplacement du clinker dans cette partie du refroidisseur. Une rampe de coulée assure une meilleure répartition du clinker dans la zone. Dans la section CIS-ADP, le flux de clinker est contrôlé par la couche de clinker et par les canons à air. Le flux de clinker retenu forme une couche protectrice froide de clinker protégeant les grilles ADP contre l'arrivée de clinkers chauds en provenance du four. Il existe des thermocouples pour mesurer la température des plaques.

1.1.2 Compartiment à barres transversales

Le compartiment à barres transversales est composé de modules comportant chacun 4 ADP sur sa largeur et 14 ADP sur sa longueur. Les modules sont montés cote à cote et extrémité contre extrémité. Ce compartiment comporte trois UGC avec trois ventilateurs K21, K31 et K41. Le transport à ce niveau est assuré par des barres transversales. Une barre sur deux se déplace vers l'avant et l'arrière alors que les autres restent fixes. Ce déplacement alternatif assure le transport du clinker. Les barres transversales sont élevées de 50mm au dessus des grilles de diffusion de l'air. Toute la section de barres transversales est inclinée de 5° depuis la section CIS-ADP en descendant vers le concasseur. Les modules à ce niveau sont liés mécaniquement pour un déplacement synchrone par groupe situé en bout.

Le déplacement des barres transversales est assuré par deux systèmes de transmission hydraulique (un à gauche du sens de flux et un à droite). Ce système de transmission est composé de six cylindres pour chacun des six modules du compartiment à barres transversales. Les deux systèmes de transmission partagent une seule station de pompage commune composée de trois pompes (une pour chaque système et une de réserve). L'unité de pompage est composée d'une pompe principale, d'une vanne proportionnelle, d'une vanne de limitation de pression et d'une pompe d'appoint.

1.1.3 Régulateurs mécaniques de débits

Les MFR maintiennent un flux d'air de refroidissement constant en compensant les variations de pression qui surviennent dans la résistance de la couche de clinker sans accroître la pression statique exigée par le ventilateur. Chaque ADP est équipée d'un MFR qui assure un flux constant quelque soit la charge en s'ouvrant et se fermant éventuellement. Le principe de fonctionnement du système ADP avec MFR permet de mieux contrôler le flux d'air. Les MFR éliminent l'effet exercé par les différences de profondeur de la couche de clinker sur la diffusion de l'air. Ainsi l'effet de ségrégation exercé par les fractions grosses et fines de clinker est anéanti. Les MFR sont suspendus dans un corps en forme de carré situé sous chacune des grilles de diffusion (ADP). En suspension, les MFR servent d'orifice dont l'ouverture varie en fonction de la différence de pression des deux cotés du MFR.

Il s'ouvre lorsque la couche de clinker résiste davantage au flux d'air. Ceci induit une pression différentielle plus basse au dessus du MFR.

Il se ferme lorsque la résistance du matériau au flux d'air s'amoindrit. Ceci induit une pression différentielle plus élevée au dessus du MFR.

Les caractéristiques des MFR sont déterminées par :

- La baisse de pression maximale que le MFR peut compenser.
- Le débit d'air que le MFR peut maintenir dans l'intervalle de fonctionnement mentionné ci-dessus.

Composition du refroidisseur :

- Compartiment 1 : 2 modules x 5 rangées = 40 ADP → 8 plaques de grille
- Compartiment 2 : 2 modules x 14 rangées = 168 ADP → 8 plaques de grille
- Compartiment 3 : 2 modules x 14 rangées = 168 ADP → 8 plaques de grille
- Compartiment 4 : 2 modules x 14 rangées = 168 ADP → 8 plaques de grille

Le refroidisseur comporte au total 376 ADP. En outre il dispose de quatre ventilateurs avec les caractéristiques suivants :

- Ventilateur K11 → 90 mbar
- Ventilateur K21 → 70 mbar

- Ventilateur K31 —————→ 70 mbar
- Ventilateur K41 —————→ 60 mbar

Quatre transmetteurs de pression sont installés pour enregistrer la pression dans chacun des compartiments avec indicateur locale ou à distance dans la salle de commande. Avec les ventilateurs, on peut normalement mesurer le flux, lire l'ampérage, ajuster le registre d'admission et régler la vitesse des ventilateurs avec indicateur à distance dans la salle de commande. Pour les températures, 9 thermocouples NiCr-Ni sont montés comme suit :

- 3 sur les grilles du refroidisseur dans le compartiment 2
- 3 sur les barres transversales fixes dans le compartiment 2
- 3 sur les barres transversales mobiles dans le compartiment 2

1.2 Théorie du refroidissement

La fonction refroidissement est un élément très important et très complexe. Ainsi une bonne maîtrise de ce principe de refroidissement permet d'optimiser davantage la récupération d'énergie thermique qui fait d'ailleurs l'objet de notre étude. Le refroidissement consiste à abaisser de manière considérable la température des clinkers provenant du four en soufflant de l'air par le bas du refroidisseur via les ventilateurs. Après échange thermique avec le clinker, l'air gagne considérablement en température. Une partie de cet air à haute température est utilisée pour la combustion dans le four : on l'appelle l'air secondaire. Une autre partie est utilisée pour les besoins de la combustion au niveau du précalcinateur : on l'appelle l'air tertiaire. Il faut noter que plus la récupération de ces airs est maîtrisée, plus elle est optimisée. Une autre partie de l'air est utilisée, après désurchauffe, au niveau des broyeurs farine crue et charbon pour le séchage des matériaux : on l'appelle l'excès d'air. Pour le broyeur ciment l'air ne subit pas une désurchauffe.

1.2.1 Epaisseur de la couche de clinker

Un kilo de clinker refroidi de 1450°C à 0°C émet 383 kcal qui correspondent à une masse de 1.155 kg d'air. Or pour chauffer cette même quantité d'air de 0°C à 1450°C on a besoin d'un apport d'énergie de 450 kcal. Ceci nous montre que l'énergie émise par le refroidissement du

clinker permet juste de chauffer l'air de 0°C à 1245°C. Ces hypothèses sont valables pour un échange thermique à contre courant. Avec ce principe le refroidisseur permet de préchauffer l'air à la température de combustion et de refroidir les clinkers à la température de l'air de refroidissement.

1.2.2 Vitesse de l'air et échange de chaleur

La vitesse de l'air joue un rôle très important dans le refroidissement du clinker.

En situation optimale on a une circulation rapide de l'air qui quitte la couche de clinker à une température légèrement inférieure aux clinkers qui sont au dessus de celle-ci. Ainsi on a une croissance linéaire de la température en fonction de l'épaisseur de la couche.

Si la circulation de l'air est lente, on a un échange sur la moitié supérieure de la couche alors que si la circulation est trop rapide, l'échange est observé sur la moitié inférieure de la couche.

1.2.3 Granulométrie et échange de chaleur

Comme la vitesse, la granulométrie aussi est un paramètre qui influe beaucoup sur le refroidissement tout en restant l'un des éléments les plus difficiles à maîtriser d'autant plus que nous ne pouvons pas accéder au refroidisseur en période de marche pour déterminer la granulométrie du clinker. Dépendamment de la taille des grains, le refroidissement varie d'une durée instantanée à une durée relativement longue.

Pour les fins clinkers, l'échange thermique entre l'air et le clinker se produit presque momentanément.

Pour les gros clinkers, on a un déplacement de la chaleur du centre vers la surface qui est lent. De ce fait il est souhaitable de réduire la vitesse de l'air à travers une couche constituée de gros clinkers.

1.2.4 Modes d'échanges de chaleur¹

1.2.4.1 Transmission de chaleur

A partir de ce principe, la chaleur s'échappe des clinkers par convection forcée. Ce processus est décrit par la loi de Newton :

$$Q = h.A.(T_{clinker} - T_{air}) \quad (II.1.1)$$

Les dimensions du clinker jouent un rôle capital dans le transport de la chaleur. Ces dimensions se décrivent au mieux en considérant la superficie A_k par rapport au volume V_k du

clinker. Or le transport de chaleur est inversement proportionnel au diamètre du clinker. Ainsi les clinkers épais exercent donc un effet négatif sur la transmission de chaleur et sur le transport de chaleur à l'intérieur du clinker.

$$\frac{A_k}{V_k} = \frac{\pi \cdot D_k^2}{\frac{\pi}{6} \cdot D_k^3} = \frac{6}{D_k} \quad (\text{II.1.2})$$

1.2.4.2 Conduction de chaleur

Ce phénomène est observé à l'intérieur des gros clinkers. Il manifeste le déplacement de la chaleur depuis le centre du clinker jusqu'à sa surface. C'est un phénomène assez lent qui nécessite une réduction de la vitesse de refroidissement.

L'indice de Biot décrit le rapport entre les deux mécanismes de transmission de chaleur à savoir la conduction et la transmission. Ainsi un Biot élevé induit une mauvaise conduction et une bonne transmission alors qu'un Biot relativement faible induit une bonne conduction.

1.2.5 Vitesse de l'air et granulométrie¹

La pénétration de l'air par le bas de la couche génère une force dirigée vers le haut. Ainsi une circulation rapide de l'air propulse les particules vers le haut. Ces particules se détachent de la grille pour être en suspension : c'est la fluidisation. Si on a une vitesse moyenne, seules les fines particules de clinkers sont en suspension alors que les particules épaisses restent en bas du fait de leur poids. La conséquence est qu'on a, avec cette situation, une couche supérieure composée de fines particules et une couche inférieure composée de particules épaisses. Pour une pression et une épaisseur de couche donnée, on a une quantité d'air importante pour les clinkers épais et une quantité moins importante pour fins clinkers. Le rapport entre la hauteur de la couche et différence de pression est établi par la relation suivante :

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2 \cdot \eta_0 \cdot V_0}{\varepsilon^2 \cdot D_{pm}^2} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_0 \cdot V_0^2}{\varepsilon^2 \cdot D_{pm}} \quad (\text{II.1.3})$$

ΔP = Chute de pression à travers les couches de clinkers

H = Hauteur de la couche de clinkers

ε = Porosité de la couche de clinkers

η_0 = viscosité de l'air

V_0 = Vitesse de l'air

D_{pm} = Diamètre moyen des particules

2.2 Paramètres du refroidisseur

Nous avons ci-après les paramètres liés au refroidisseur.

NB : les symboles avec l'indice (f) désignent le terme référence.

	T_0	(°C)	: température du clinker à la sortie du refroidisseur.
	C_pCT_0	(kcal/kg.°C)	: Cp du clinker à la température T_0 .
	T_E	(°C)	: température excès d'air.
	M_E	(kg/h)	: débit massique de l'excès d'air.
	C_pET_E	(kcal/kg.°C)	: Cp de l'excès d'air à la température T_E .
	P_E	(kair/kgclinker)	: Pertes dues à l'excès d'air.
	ρ	(kg/Nm ³)	: densité de l'air dans les CNTP.
	n_1	(%)	: vitesse du ventilateur FN030.
	N_1	(kW)	: Puissance du ventilateur FN030.
	P_{elec}	(kW)	: Puissances électriques dues aux ventilateurs.
	P_{elecs}	(kW/kgclinker)	: Puissances électriques spécifiques dues aux ventilateurs.
	N_2	(%)	: puissance réelle du ventilateur FN310.
	n_2	(%)	: vitesse réelle du ventilateur FN310.
	η_2	(%)	: rendement réel du ventilateur FN310.
	ρ_f	(kg/Nm ³)	: densité de référence.
	Q_f	(Nm ³ /h)	: débit de référence.
	N_f	(kW)	: Puissance de référence.
	n_f	(rpm)	: vitesse de référence.
	P_{tf}	(Pa)	: Pression de référence.
	η_f	(%)	: rendement de référence.
	S	(m ²)	: Surface totale.
	RA	(kcal/kgclinker)	: Pertes par radiation.
	CON	(kcal/kgclinker)	: Pertes par convection.
	T_v	(K)	: Température de la virole du refroidisseur.
	T_a	(K)	: Température ambiante.
	M_a	(kg/h)	: Débit massique d'air de refroidissement.
	T_{ar}	(K)	: Température air de refroidissement.
	C_pAT_{ar}	(kcal/kg.°C)	: capacité thermique massique air de refroidissement.
	Q_m	(kg/h)	: débit massique.

-  **Q_{mT}** (kg/h) : Débit massique totale des ventilateurs de soufflage.
-  **P_c** (kcal/kgclinker) : Pertes dues au clinker.
-  **ΔT₀** (°C) : Variation de température du clinker.
-  **ΔT_E** (°C) : Variation de température de l'excès d'air.
-  **PR** (kcal/kgclinker) : Pertes au refroidisseur.
-  **CSR** (t/24h/m²) : Charge spécifique du refroidisseur.
-  **DVAT** (Nm³/h) : Débit volumique d'air total.
-  **DMAT** (kg/h) : Débit massique d'air total.
-  **DSAT** (kgair/kgclinker) : Débit spécifique d'air total.
-  **LOI** (%) : Pertes au feu.

Pour le ventilateur 442 FN 030

$$\begin{aligned}\rho_{f1} &= 0,94 \text{ kg/m}^3 \\ Q_{f1} &= 119160 \text{ m}^3/\text{h} \\ N_{f1} &= 135,72 \text{ kW} \\ n_{f1} &= 995 \text{ rpm} \\ P_{t_{f1}} &= 3450 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Pour le ventilateur 541 FN 310

$$\begin{aligned}\rho_{f1} &= 1.205 \text{ kg/m}^3 \\ Q_{f2} &= 19440 \text{ m}^3/\text{h} \\ N_{f2} &= 7030 \text{ kW} \\ n_{f2} &= 1054 \text{ rpm} \\ P_{t_{f2}} &= 1069 \text{ Pa}\end{aligned}$$

2.3 Calcul de rendement⁴

$$C_{pC}T_0 = 0,186 + 54 \cdot 10^{-6} \times T_0 \quad (\text{II.2.1})$$

$$C_{pE}T_E = 0,237 + 23 \cdot 10^{-6} \times T_E \quad (\text{II.2.2})$$

$$C_{pA}T_{ar} = 0,237 + 23 \cdot 10^{-6} \times T_{ar} \quad (\text{II.2.3})$$

$$Q_m = \eta \cdot N \cdot \frac{1}{n^2} \cdot \frac{n_{ref}^2 \cdot \rho_{ref}}{P_{ref}} \quad (\text{II.2.5})$$

$$(\text{II.2.4}) Q_{mT} = \eta_1 \cdot N_1 \cdot \frac{1}{n_1^2} \cdot \frac{n_{ref1}^2 \cdot \rho_{ref1}}{P_{ref1}} + \eta_2 \cdot N_2 \cdot \frac{1}{n_2^2} \cdot \frac{n_{ref2}^2 \cdot \rho_{ref2}}{P_{ref2}} \quad (\text{II.2.5})$$

$$M_E = \frac{\eta_1 \cdot N_1 \cdot \frac{1}{n_1^2} \cdot \frac{n_{ref1}^2 \cdot \rho_{ref1}}{P_{ref1}} + \eta_2 \cdot N_2 \cdot \frac{1}{n_2^2} \cdot \frac{n_{ref2}^2 \cdot \rho_{ref2}}{P_{ref2}}}{kg.clin\ ker/h} \quad (\text{II.2.6})$$

$$kgair.de.refroidissement/h = \rho_1 \cdot Q_{V1} + \rho_2 \cdot Q_{V2} + \rho_3 \cdot Q_{V3} + \rho_4 \cdot Q_{V4} \quad (\text{II.2.7})$$

$$M_a = \frac{\rho \cdot (Q_{N1} + Q_{N2} + Q_{N3} + Q_{N4})}{kg \cdot clinker / h} \quad (II.2.8)$$

$$RA = \frac{4 \cdot 10^{-8} \cdot (T_v^4 - T_a^4) \cdot S}{kg \cdot clinker / h} \quad (II.2.9)$$

$$CON = \frac{80,33 \cdot \left(\frac{T_v + T_a}{2} \right)^{-0,724}}{kg \cdot clinker / h} \cdot (T_v - T_a)^{1,333} \cdot S \quad (II.2.10)$$

$$Pertes.refroidisseur = T_0 \cdot CpCT_0 + M_E \cdot T_E \cdot CpET_E + RA + CON \quad (II.2.11)$$

$$\eta(\%) = 100 - \frac{100 \cdot Pertes.refroidisseur}{(1450 \cdot Cp_{1450}) + (M_a \cdot T_a \cdot CpAT_{ar})} \quad (II.2.12)$$

$$\Delta T = T - 0^\circ C \quad (II.2.13)$$

$$P_c = CpCT_0 \times \Delta T_0 \quad (II.2.14)$$

$$P_E = CpCT_E \times \Delta T_E \quad (II.2.15)$$

$$P_R = P_c + P_E \quad (II.2.16)$$

$$CSR = \frac{Q_{mclinker} \times 24h}{37} \cdot (t / 24h / m^2) \quad (II.2.17)$$

$$CSR = \left(\frac{CSR}{47,3} - 1 \right) \times 100 (\%) \quad (II.2.18)$$

$$DVAT = Q_{N1} + Q_{N2} + Q_{N3} + Q_{N4} \quad (II.2.19)$$

$$DMAT = \rho_0 . DVAT \quad (II.2.20)$$

$$D S A T = \frac{D M A T}{Q_{m c l i n k e r}} \quad (II.2.21)$$

$$P_{elec} = P_{N1} + P_{N2} + P_{N3} + P_{N4} \quad (II.2.22)$$

$$P_{e l e c s} = \frac{P_{N1} + P_{N2} + P_{N3} + P_{N4}}{Q_{m c l i n k e r}} \quad (II.2.23)$$

2.4 Sources de paramètres⁴

N°	Désignation	Symbole	Unité	Source
1	Température du clinker à la sortie du refroidisseur	T0	°C	Mesure sur site
2	Température excès d'air	TE	°C	mesure
3	Température de la virole du refroidisseur	Tv	K	Mesure sur site
4	Température ambiante	Ta	K	Mesure sur site
5	Température air de refroidissement	Tar	°C	Mesure sur site
6	Débit massique de clinker	Qmclinker	kgclinker/h	mesure
7	Puissance réelle du FN030	N1	kW	donnée
8	Vitesse réelle du FN030	n1	%	donnée
9	Rendement du ventilateur FN030	η1	%	donnée
10	Puissance réelle du FN310	N2	%	donnée
11	Vitesse réelle du FN310	n2	%	donnée
12	Rendement du ventilateur FN310	η2	%	donnée
13	Densité de référence du ventilateur	ρf	kg/Nm3	donnée
14	Débit de référence du ventilateur	Qf	Nm3/h	donnée
15	Puissance de référence du ventilateur	Nf	kW	donnée
16	Vitesse de référence au niveau du ventilateur	nf	rpm	donnée

17	Pression de référence dans le ventilateur	Ptf	Pa	donnée
18	Rendement de référence du ventilateur	η_f	%	donnée
19	Surface totale	S	m ²	donnée
20	Densité de l'air dans les CNTP	ρ	kg/Nm ³	constante
21	Débit massique air de refroidissement	Ma	kg/h	calcul
22	Débit massique total d'excès d'air	ME	kg/h	calcul
23	Cp de l'excès d'air à la température TE	CpETE	kcal/kg.°C	calcul
24	Pertes par radiation	RA	kcal/kgclinker	calcul
25	Pertes par convection	CON	kcal/kgclinker	calcul
26	Cp de l'air de refroidissement à la température Tar	CpATar	kcal/kgclinker	calcul
27	Débit massique	Qm	kg/h	calcul
28	Rendement du refroidisseur	η	%	calcul
29	Pertes dues au clinker	Pc	kcal/kgclinker	calcul
30	Pertes dues à l'excès d'air	PE	kcal/kgclinker	calcul
31	Variation de la température du clinker	ΔT_0	°C	calcul
32	Variation de la température excès d'air	ΔT_E	°C	calcul
33	Pertes au refroidisseur	PR	kcal/kgclinker	calcul
34	Charge spécifique du refroidisseur	CSR	t/24h/m ²	calcul
35	Charge spécifique du refroidisseur ²	CSR ²	%	calcul
36	Débit volumique d'air total	DVAT	Nm ³ /h	calcul
37	Débit massique d'air total	DMAT	kg/h	calcul
38	Débit spécifique d'air total	DSAT	kgair/kgclinker	calcul
39	Puissances électriques des ventilateurs	Pelec	kW	calcul
40	Puissances électriques spécifiques des ventilateurs	Pelec _s	kW/kgclinker	calcul

Tableau 1 : Sources de paramètres

CHAPITRE 3 : INSTRUMENTATION

3.1 Campagne de mesure

CAMPAGNE DE MESURE							
Date:.....							
N°	Paramètres	Sources	Unités	PERIODICITE			
				09H30	10H30	11H30	12H30
3	Vitesse ventilateur FN300	mesure	m/s	X			
4	Vitesse ventilateur FN301	mesure	m/s		X		

Sujet : Conception d'un moteur de calcul automatisé pour l'optimisation de la récupération de l'énergie thermique au niveau du refroidisseur clinker

5	Vitesse ventilateur FN302	mesure	m/s			X	
6	Vitesse ventilateur FN303	mesure	m/s				X
21	Température air ambiant	mesure	K	X	X	X	X
23	Température sortie refroidisseur EST	labo	°C	X	X	X	X
24	Température sortie refroidisseur OUEST	labo	°C	X	X	X	X
25	Granulométrie EST	labo	-	X	X	X	X
26	Granulométrie OUEST	labo	-	X	X	X	X
44	Phase liquide	labo	-	X	X	X	X
45	Chaux libre	labo	-	X	X	X	X
1	Débit farine	salle com.	t/h	Données à prendre à la salle de commande au niveau du logiciel Plant Guide aux heures de mesure			
2	Etat ATOX	salle com.	Marche/arrêt				
7	Pression ventilateur FN300	salle com.	Mbar				
8	Pression ventilateur FN301	salle com.	Mbar				
9	Pression ventilateur FN302	salle com.	Mbar				
10	Pression ventilateur FN303	salle com.	Mbar				
11	Puissance ventilateur FN300	salle com.	%				
12	Puissance ventilateur FN301	salle com.	%				
13	Puissance ventilateur FN302	salle com.	%				
14	Puissance ventilateur FN303	salle com.	%				
15	Puissance ventilateur FN030	salle com.	kW				
16	Vitesse ventilateur FN030	salle com.	%				
17	Puissance ventilateur FN310	salle com.	%				
18	Vitesse ventilateur FN310	salle com.	%				
19	Vitesse air primaire	salle com.	%				
20	Température excès d'air	salle com.	°C				
22	Température capot de chauffe	salle com.	°C				
27	Pression capot de chauffe	salle com.	Mbar				
28	Pression au niveau du refroidisseur	salle com.	Mbar				
29	Vitesse grille 1	salle com.	st/min				
30	Vitesse grille 2	salle com.	st/min				
31	Pression hydraulique grille 1	salle com.	Bar				
32	Pression hydraulique grille 2	salle com.	Bar				
33	Vitesse four	salle com.	tr/min				
34	Ratio grille	salle com.	-				
35	Ratio air	salle com.	-				
36	O2 BF	salle com.	%				
37	O2 C1	salle com.	%				
38	Module de clinker MS	salle com.	-				
39	Module de clinker MA	salle com.	-				
40	Module de clinker LSF	salle com.	%				

41	Module de farine MS	salle com.	-
42	Module de farine MA	salle com.	-
43	Module de farine LSF	salle com.	%

Tableau 2 : Campagne de mesure

3.2 Mesure et calcul de débit

Ce paramètre est d'une importance capitale surtout pour les ventilateurs de refroidissement. Il n'est pas obtenu directement par mesure sur site mais plutôt par calcul. Ainsi on aura à mesurer la vitesse sur site pour ensuite appliquer la formule de calcul du débit. On peut obtenir la vitesse de deux manières :

- ✓ Soit directement à l'aide d'un anémomètre à partir duquel on peut lire la valeur de la vitesse.
- ✓ Soit à partir d'une formule dans laquelle on a la pression dynamique qu'on peut mesurer sur site.

On a :

Débit volumique : $Q_v = V \times A$ (II.3.1)

Débit massique : $Q_m = \rho \times Q_v$ (II.3.2)

Avec :

- V : vitesse du fluide (m/s)
- A : section de la conduite (m²)
- ρ : masse volumique (kg/Nm³)

▪ Mesure de la vitesse :

La vitesse peut être mesurée à l'aide d'un anémomètre qui nous donne directement la valeur. Cette mesure peut être effectuée pour des températures relativement inférieures à 50°C. il faut au préalable vérifier la valeur maximale mesurable avec l'appareil et comparer cela avec l'ordre des valeurs à mesurer pour pouvoir être sûr de la valeur affichée.

▪ Calcul de la vitesse avec mesure de la pression :

On a :
$$V = \sqrt{\frac{2gP_d}{\rho_0 \cdot \frac{273}{273+t} \cdot \frac{10333b/b_0 + P_s}{10333}}} \quad (II.3.3)$$

Avec :

P_d : Pression dynamique (mesurée sur site)

ρ : masse volumique (elle est fonction de la température)

La pression dynamique est mesurée à l'aide d'un appareil appelé tube de Pitot. Cet appareil aussi nous permet, en modifiant les raccords, de mesurer la pression statique.

La masse volumique est fonction de la température. Elle est calculée à partir de la formule suivante :

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{b / b_0 \cdot 10333 + P_s}{10333} \quad (\text{II.3.4})$$

$$\rho_0 = 1.285 \text{ kg/Nm}^3$$

$$b_0 = 760 \text{ mmHG}$$

Ainsi on a :

$$V = \sqrt{\frac{2 g P_d}{\rho_0 \cdot \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{10333 b / b_0 + P_s}{10333}}} \quad (\text{II.3.5})$$

- P_d : Pression dynamique
- P_s : Pression statique
- ρ : Densité de l'air
- g : accélération de la pesanteur
- t : température de l'air mesuré

or :

$$b = b_0 \cdot e^{(-0.0001255 \cdot H)} \quad (\text{II.3.6})$$

b : pression barométrique à la hauteur H .

b_0 : pression barométrique au niveau de référence (niveau de la mer)

H : hauteur du niveau de mesure à partir du niveau de référence.

Finalement on utilise directement la formule suivante :

$$V = \sqrt{\frac{2 g P_d}{\rho_0 \cdot \frac{273}{273 + t} \cdot \frac{10333 e^{(-0.0001255 \cdot H)} + P_s}{10333}}} \quad (\text{II.3.7})$$

3.3 Boucles de régulation

Les boucles de régulation permettent de superviser le procédé de par l'opérateur au niveau de la salle de commande. Cette supervision consiste à donner des consignes de fonctionnement et de recevoir des informations sur la valeur actuelle via les écrans de supervisions. Pour le refroidisseur nous deux boucles de régulation essentielles.

3.3.1 Régulation des ventilateurs de refroidissement

Cette boucle de régulation permet de superviser le fonctionnement des ventilateurs de soufflage du refroidisseur.

La régulation consiste d'abord à donner une consigne de débit pour chaque ventilateur. En outre, le ratio, qui est le taux de débit fixé par l'opérateur, permet d'agir simultanément sur les quatre valeurs de consigne en modifiant la valeur du ratio de 0 à 1. Ainsi à partir du tableau on obtient les informations par rapport aux vitesses des variateurs qui pilotent les ventilateurs. Aussi nous avons les valeurs réelles des débits (en Nm^3/min) obtenus par calcul. Le mode régulateur est en cascade : consigne de débit transformée en vitesse

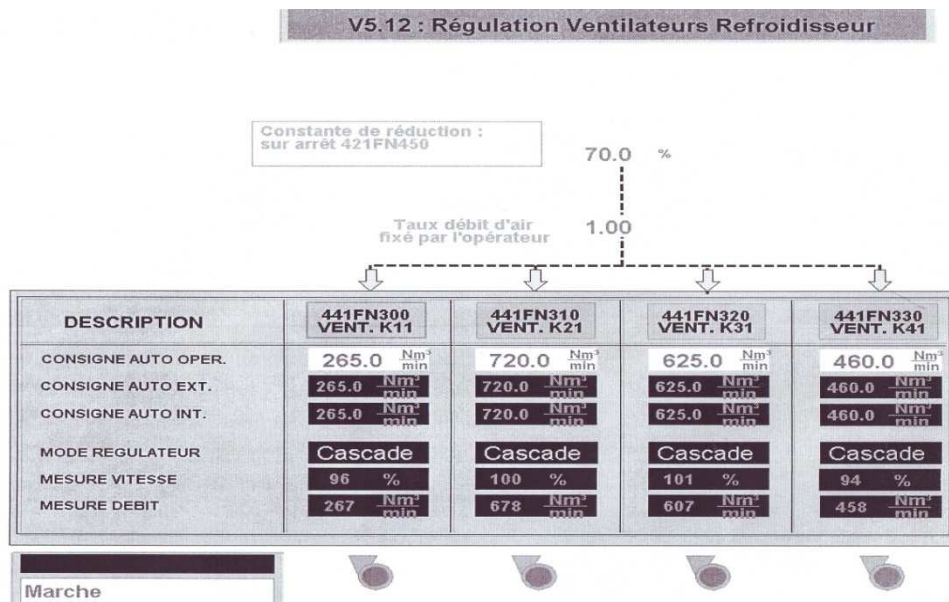


Figure 5 : Boucle de régulation des ventilateurs du refroidisseur

3.3.2 Régulation des grilles du refroidisseur

Cette boucle de régulation permet la régulation de la hauteur de couche via les vitesses des grilles.

En effet, la régulation consiste à donner une consigne de pression (en mbar) au niveau du refroidisseur. Ainsi un ajustement sera effectué automatiquement sur les vitesses des grilles pour stabiliser la pression de consigne. Donc si les valeurs des ratios sont égales, les vitesses des deux grilles sont égales. Or, compte tenu du fait qu'avec le sens de rotation du four, on peut avoir des différences du point de vue de la granulométrie au niveau des deux grilles. De ce fait on agit sur les ratios pour différencier la vitesse d'une des grilles par rapport à l'autre. Comme information supplémentaire, on a la pression hydraulique au niveau des vérins (en bar). Le mode **régulateur est en cascade. Consigne de pression transformée en vitesse.**

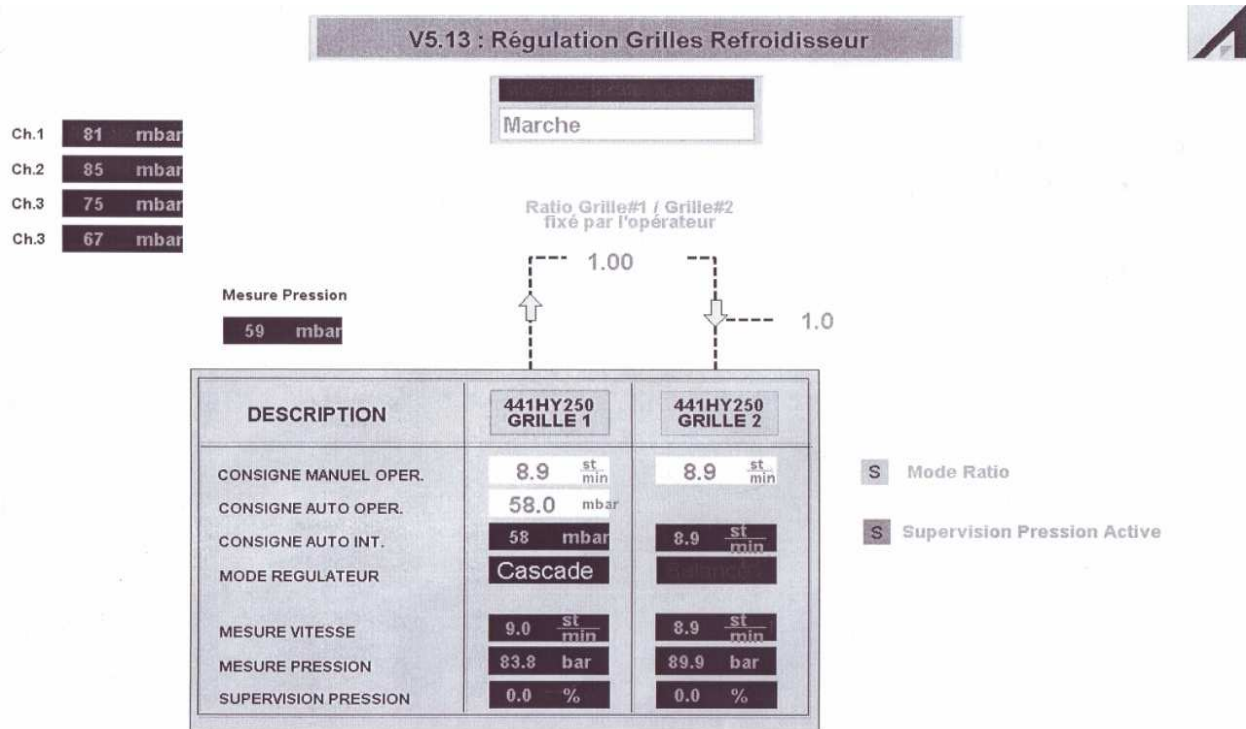


Figure 6 : boucle de régulation des grilles du refroidisseur

CONCLUSION

Au terme de notre analyse dans cette partie de l'étude nous avons pu nous familiariser avec le refroidisseur en prenant connaissance de son principe de fonctionnement et de ses caractéristiques de fonctionnement. Les bilans thermiques nous ont permis d'apprécier les enjeux énergétiques qui s'opèrent à ce niveau.

Par ailleurs, on s'est rendu compte que le refroidisseur est un équipement très sensible au point qu'il doit faire l'objet d'une parfaite maîtrise et d'une attention particulière pour pouvoir observer un suivi constant permettant une bonne récupération de l'énergie.

Et ceci nous amène à procéder au diagnostic des performances de refroidisseur qui sera développer dans la partie suivante.

TROISIEME PARTIE :

**DIAGNOSTIC DES PERFORMANCES DU
REFROIDISSEUR ET OPTIMISATION**

INTRODUCTION

L'optimisation de la récupération d'énergie thermique au niveau du refroidisseur passe d'abord par une caractérisation de ses performances actuelles. Ainsi, les premières séries de mesure auront pour objectif de faire l'état des lieux en situant les paramètres et calculer les rendements à cet effet. Cela nous permettra de canaliser le diagnostic à faire.

Par ailleurs, les paramètres ainsi que les méthodes de mesure doivent faire l'objet d'une bonne maîtrise avant de commencer l'expérimentation. C'est la raison pour laquelle nous allons aborder les paramètres et méthodes de mesure au niveau du premier chapitre. Ensuite nous allons procéder à l'expérimentation au chapitre 2. Dans ce chapitre nous allons faire aussi bien la caractérisation que l'optimisation à travers les différentes séries de mesure. Enfin nous aborderons au niveau du chapitre 3 la conception du moteur de calcul automatisé avec la programmation des équations sous Visual Basic.

CHAPITRE 1 : PARAMETRES ET METHODES DE MESURE

1.1 Les ventilateurs de soufflage

Ces ventilateurs de soufflage assurent le refroidissement du clinker en injectant de l'air par le bas qui traverse par la suite le lit de matière au niveau du refroidisseur. Ces ventilateurs sont disposés sur tout le long du refroidisseur.

1.1.1 Prédiposition pour le mesurage

Les ventilateurs de soufflage sont disposés deux à deux de part et d'autre du refroidisseur. Les moteurs qui assurent le soufflage se situent au niveau zéro mètre alors que les gaines d'aspirations se situent à des altitudes de plus ou moins 20 mètres au dessus des moteurs. Ainsi, deux de ces ventilateurs (441FN320 et 441FN330) peuvent être directement accédés à partir des structures préétablies alors que les ventilateurs 441FN300 et 441FN310 nécessitaient des échafaudages pour effectuer les mesures en altitude. Donc ces échafaudages ont été réalisés par le service manutention et ils ont été maintenus à ces endroits jusqu'à la fin des mesures.

Pour les mesures de pression dynamiques et statiques, des trous ont été réalisés sur les gaines à cet effet. On a rencontré des difficultés pour l'ouverture des trous des ventilateurs 441FN310 et 441FN330 qui nous ont obligés à faire appel aux services de la chaudronnerie.

La mesure de la pression dynamique impose une prédéfinition des points de mesure qui dépendait de la taille du diamètre.

Pour nos quatre ventilateurs, avec 55cm de diamètre d'aspiration pour le FN300 et 70cm de diamètre pour le reste, nous avons besoin de quatre points de mesure selon les règles du constructeur FLSmidth. Ces points de mesure ont été repérés sur la grille de la gaine d'aspiration. Mais pour des raisons de précision ces points ont été finalement reportés sur le tube de Pitot qui nous a beaucoup facilité les mesures par la suite.

1.1.2 Température ambiante

Pour calculer la vitesse avec les pressions dynamiques et statiques, on avait besoin aussi de la température à côté de chacune des gaines d'aspirations des ventilateurs. Ainsi, à chaque prise de mesure des pressions et des vitesses, nous exposons un thermomètre à côté pour relever la valeur de la température à ce moment. Ceci nous évitait de retenir arbitrairement une valeur comme température ambiante alors que nous savons que les ventilateurs sont disposés à des endroits différents par rapport au refroidisseur. La preuve, les ventilateurs 441FN310 et

441FN330 présentait toujours des températures plus élevées que les autres. Ces températures étaient de l'ordre de 25°C le matin et 32°C dans l'après midi.

1.1.3 Pression dynamique

Elle permet de calculer la vitesse à partir de la formule énoncée dans le chapitre 2 de la Première Partie. Elle est mesurée à l'aide d'un appareil appelé tube de Pitot en tenant compte du sens du flux.

Procédure :

- ✓ Faire les raccordements des flexibles avec l'appareil et le tube en métal tout en respectant les polarisations + et -.
- ✓ Allumer l'appareil et choisir l'unité de mesure (mmH₂O pour notre cas)
- ✓ Ouvrir le bouchon du trou pour avoir accès à l'intérieur de la gaine.
- ✓ Introduire le tube de sorte que le trou au niveau du tube s'ouvre dans le sens opposé du flux.
- ✓ Positionner le tube au niveau du premier point de mesure repéré sur le tube en métal.
- ✓ Attendre que la mesure soit stable pour relever la valeur qui sera reportée sur la fiche.
- ✓ Reprendre les deux dernières étapes jusqu'à épuiser les quatre points de mesurer avant de passer à un autre ventilateur.

1.1.4 Pression statique

Elle est mesurée avec le même appareil en changeant juste les raccordements du flexible.

Procédure :

- ✓ A partir du branchement pour la mesure de la pression dynamique, enlever le tube en métal et le flexible sur le pôle + et y laisser seulement le flexible raccordé au pôle – de l'appareil.
- ✓ Introduire le flexible à travers le trou et le maintenir à la position perpendiculaire du sens du flux.
- ✓ Attendre que la mesure soit stable pour relever la valeur qui sera reportée sur la fiche.

1.1.5 Vitesse d'aspiration

Elle permet d'obtenir directement la valeur de la vitesse qui était calculée précédemment avec les pressions et la température. Elle est mesurée à l'aide d'un appareil appelé anémomètre. Cet appareil peut mesurer une vitesse maximale de 40 m/s. il est composé d'un tube muni

d'une petite hélice au bout et d'un appareil avec un écran d'affichage. Ces deux éléments sont reliés par un fil.

Procédure :

- ✓ Allumer l'appareil
- ✓ Choisir l'unité de mesure (m/s dans notre cas).
- ✓ Positionner l'axe de l'hélice au premier point de mesure de sorte que le flux puisse faire tourner les pales de l'hélice.
- ✓ Attendre que la valeur soit stable avant de la reporter sur la fiche de mesure.
- ✓ Effectuer les mêmes opérations sur tous les points de mesure avant de passer à un autre ventilateur.

1.2 Température sortie refroidisseur

Elle nous renseigne sur la valeur de la température à la sortie du refroidisseur. Elle est obtenue à partir des deux échantillons prises des deux cotés du refroidisseur (Est et Ouest) et d'un thermocouple qui nous permet d'effectuer la mesure.

Procédure :

- ✓ Ouvrir la porte de visite de l'un des cotés au choix (est ou ouest).
- ✓ Introduire la lance pour prendre un échantillon puis verser la prise dans un seau.
- ✓ Allumer l'appareil du thermocouple et s'assurer que le type K est sélectionné.
- ✓ Plongé le thermocouple dans l'échantillon et attendre que la valeur se stabilise.
- ✓ Plonger à nouveau le thermocouple dans l'échantillon à un endroit différent du précédant et attendre que la valeur se stabilise pour reporter cette deuxième valeur.
- ✓ Reprendre cette opération pour une troisième fois dans ce même échantillon.
- ✓ Récapituler les trois valeurs pour cet échantillon.
- ✓ Verser l'échantillon avant de procéder à la deuxième prise d'échantillon.
- ✓ Reprendre les mêmes opérations pour obtenir trois valeurs de températures pour ce nouvel échantillon.
- ✓ Faire la moyenne des six valeurs pour obtenir la valeur de la température du clinker.

1.3 Température du casing du refroidisseur

Pour estimer les pertes par radiation et convection du refroidisseur il faut nécessairement connaître la température du casing. A cet effet nous utilisons un thermomètre à contact pour effectuer la mesure.

Procédure :

- ✓ Placer le thermomètre au niveau du premier point de mesure.
- ✓ Attendre un moment pour que l'échange de chaleur puisse être effectif entre la paroi et l'appareil de mesure.
- ✓ Relever la température affichée puis changer de point de mesure.
- ✓ Refaire les mêmes opérations pour les autres points de mesure
- ✓ Faire la moyenne des mesures pour obtenir la température du casing.

CHAPITRE 2 : EXPERIMENTATION

2.1 Refroidisseur Cross bar SF 2 X 3 F

2.1.1 Paramètres standards du refroidisseur SF 2 X 3 F³

Les paramètres standards du refroidisseur SF 2 X 3 F ont été établis par le constructeur. En effet, ces paramètres permettent à l'exploitant d'évaluer de manière permanente l'efficacité du refroidisseur. Autrement dit ces paramètres servent de référence à partir desquels on peut définir les marges de manœuvre pour agir sur le refroidisseur.

Parmi ces paramètres standards on peut citer :

 Air secondaire :

- ✓ Masse d'air = 0.45 kg.air/kg.clinker
- ✓ Température = 1260°C
- ✓ Energie = 150 kcal/kg.clinker

 Air tertiaire :

- ✓ Masse d'air = 0.65 kg.air/kg.clinker
- ✓ Température = 870°C
- ✓ Energie = 145 kcal/kg.clinker

 Air de refroidissement :

- ✓ Masse d'air = 2.15 kg.air/kg.clinker
- ✓ Température = 35 °C
- ✓ Energie = 18 kcal/kg.clinker

 Sortie Clinker :

- ✓ Masse de clinker = 1 kg.air/kg.clinker
- ✓ Température = 100°C

✓ Energie = 19 kcal/kg.clinker

✚ Excès d'air

✓ Masse d'air = 1.05 kg.air/kg.clinker

✓ Température = 295°C

✓ Energie = 75 kcal/kg.clinker

✚ Clinker provenant du four :

✓ Température = 1450°C

✓ Energie = 383 kcal/kg.clinker

✚ Pertes par Radiation : 11 kcal/kg.clinker

✚ Pertes totales du refroidisseur = 105 kcal/kg.clinker

✚ Pertes standards du refroidisseur = 85 kcal/kg.clinker

Dans ces conditions standards le rendement est :

$$\eta = 74\%$$

Ainsi l'objectif principal de la production est de se rapprocher davantage de ces valeurs qui donnent le meilleur rendement.

2.1.2 Comparaison avec les autres types de refroidisseur³

Le refroidisseur Cross Bar 2 X 3 F est un refroidisseur de dernière génération. Aussi bien sur le plan de la technologie utilisée au niveau du système de transport avec les barres transversales que le système de refroidissement avec les MFR, le refroidisseur SF 2 X 3 F offre de meilleures performances comparé aux autres types de refroidisseurs.

Parmi les autres types de refroidisseur on note les performances suivantes :

✚ Planetary cooler :

✓ Radiation = 97 kcal/kg.clinker

✓ Sortie clinker (150°C) = 25 kcal/kg.clinker

✓ Pertes totales = 112 kcal/kg.clinker

✚ Rotary cooler:

✓ Radiation = 75 kcal/kg.clinker

✓ Sortie clinker (225°C) = 45 kcal/kg.clinker

✓ Pertes totales = 120 kcal/kg.clinker

 Conventional Grate cooler:

✓ Radiation = 6 kcal/kg.clinker

✓ Excès d'air (240°C @ 1.85kg/kg) = 108 kcal/kg.clinker

✓ Sortie clinker (90°C) = 17 kcal/kg.clinker

✓ Pertes totales = 131 kcal/kg.clinker

 Air BEAM Grate cooler:

✓ Radiation = 6 kcal/kg.clinker

✓ Excès d'air (240°C @ 1.2kg/kg) = 70 kcal/kg.clinker

✓ Sortie clinker (90°C) = 17 kcal/kg.clinker

✓ Pertes totales = 131 kcal/kg.clinker

 Cross Bar cooler:

✓ Radiation = 6 kcal/kg.clinker

✓ Excès d'air (240°C @ 1.85kg/kg) = 58 kcal/kg.clinker

✓ Sortie clinker (90°C) = 17 kcal/kg.clinker

✓ Pertes totales = 81 kcal/kg.clinker

2.2 Principe de l'expérimentation

Une série de mesure est un ensemble de mesure opéré en des intervalles de temps réguliers et prédéterminés en concertation avec le chef de département production. Pour chaque mesure on définit au préalable l'objectif recherché qui conditionne la définition des hypothèses. Une fois ces hypothèses définies, on coordonne avec la salle de commande pour s'assurer de la stabilité du four. A l'heure prévue pour la mesure, on avertit l'opérateur du four du démarrage de la séance de mesure et on commence par prendre les vitesses d'aspirations, les pressions statiques et la température ambiante des ventilateurs de soufflage suivant les méthodes de mesure définies au chapitre précédant. Ensuite nous effectuons la mesure de la température du casing du refroidisseur avec le thermomètre de contact. Il faut noter que seules ces mesures de pressions, de vitesse et de température ne nous prennent pas moins de 30mn. Après nous procédons à la mesure de la température sortie clinker avec les outils du laboratoire de physique. Ces mesures de température sont effectuées des deux cotés du refroidisseur (coté EST et OUEST). Pour une série qui concerne souvent une journée on effectue une mesure de granulométrie avec un échantillon pris au niveau du silo incuit. A la fin des prises de mesure, le chef de département nous donne les rapports du logiciel plant guide pour avoir les valeurs

des autres paramètres qui nous permettent de calculer le rendement. Ainsi, à partir de la feuille de calcul préétablie sur Excel, nous insérons les valeurs et calculons les rendements pour enfin dégager les interprétations.

2.3 Série de mesure

En tout on a réalisé plusieurs séries de mesure parmi lesquelles on a retenu six (6) jugées fiables de par la précision des mesures et la stabilité du four. Avec ces six mesures nous avons réalisé 19 expériences donnant chacune une valeur du rendement du refroidisseur. Par ailleurs, il faut noter que certaines de ces expériences étaient effectuées à titre répétitif pour confirmer certaines tendances. Cependant l'arrêt du four pour maintenance nous a contraints d'arrêter les mesures.

2.3.1 Série N°1

Elle n'est pas la première série effectuée mais plutôt la première série retenue fiable.

a. Hypothèses :

Série N°1		Date: 19 mars 2009	
Désignation	Symbole	Valeurs	Unités
Ratio Grille	RG	1	-
		1	-
		1	-
Ratio Air	RA	1	-
		1	-
		1	-
Pression Capot de chauffe	Pcap	-0,5	mbar
		-0,51	mbar
		-0,5	mbar

Tableau 3: Hypothèses de la série de mesure N°1

b. Résultats :

Série N°1		Date: 19 mars 2009		
Désignation	Symbole	Heure	Valeurs	Unités
Rendement	η	12h55mn	59	%

		15h00mn	61	%
		16h40mn	62	%
Pertes totales	Pertestot	12h55mn	159	kcal/kg.clinker
		15h00mn	153	kcal/kg.clinker
		16h40mn	149	kcal/kg.clinker
Température du clinker	T ₀	12h55mn	269	°C
		15h00mn	206	°C
		16h40mn	165	°C
Température Excès d'air	T _E	12h55mn	306	°C
		15h00mn	332	°C
		16h40mn	348	°C
Vitesse Grille 1	VG1	12h55mn	9,4	st/min
		15h00mn	9,9	st/min
		16h40mn	9	st/min
Vitesse Grille 2	VG2	12h55mn	9,4	st/min
		15h00mn	9,9	st/min
		16h40mn	10,8	st/min
Température Capot de chauffe	T _{cap}	12h55mn	980	°C
		15h00mn	983	°C
		16h40mn	976	°C
Pression refroidisseur	Pref	12h55mn	59	mbar
		15h00mn	60	mbar
		16h40mn	60	mbar
Granulométrie	G	12h55mn	G6	
		15h00mn		
		16h40mn		

Tableau 4 : Résultats de la série de mesure N°1

c. Analyse :

En effet, les hypothèses pour cette série de mesure étaient essentiellement constituées des paramètres habituels du refroidisseur à savoir Ratio Grille = 1, Ratio Air = 1 et Pression Capot de chauffe = -0.51mbar. Ces expériences permettent de caractériser le refroidisseur en faisant l'état des lieux avant de procéder à la modification des paramètres.

D'après les résultats de la série on a :

- Rendements relativement faibles qui sont dus entre autre à la température élevée de la sortie du clinker et à la température de l'excès d'air.
- Pertes totales trop élevées (environ 155 kcal/kg.clinker) par rapport aux pertes standards (85 kcal/kg.clinker).

- Température sortie clinker trop élevée et occasionnée par la haute température du coté EST comparée à celle du coté OUEST. Et ceci est dû à l'égalité des deux vitesses des grilles (VG1 ~ 9.5st/min et VG2 ~ 9.9st/min).
- Le débit d'air de refroidissement ($Ma = 1.8 \text{ kg.air/kg.clinker}$) est inférieur à la valeur standard qui est égale à $2.15 \text{ kg.air/kg.clinker}$.
- La température de l'excès d'air ($T_e = 325^\circ\text{C}$) est supérieure à la valeur standard qui est égale à 295°C .

2.3.2 Série N°2

a. Hypothèses : Variation Ratio Grille

Série N°2			Date: 20 mars 2009	
Désignation	Symbole	Heure	Valeurs	Unités
Ratio Grille	RG	10h00mn	1,25	-
Ratio Air	RA	10h00mn	1	-
Pression Capot de chauffe	Pcap	10h00mn	-0,5	mbar

Tableau 5: Hypothèses de la série de mesure N°2

b. Résultats :

Série N°2			Date: 20 mars 2009	
Désignation	Symbole	Heure	Valeurs	Unités
Rendement	η	10h00mn	70	%
Pertes totales	Pertestot	10h00mn	118	kcal/kg.clinker
Température du clinker	T_0	10h00mn	86	$^\circ\text{C}$
Température Excès d'air	T_E	10h00mn	298	$^\circ\text{C}$
Vitesse Grille 1	VG1	10h00mn	7,1	st/min
Vitesse Grille 2	VG2	10h00mn	8,9	st/min
Température Capot de chauffe	Tcap	10h00mn	970	$^\circ\text{C}$

		16h00mn	0,95	-
Pression Capot de chauffe	Pcap	09h50mn	-0,5	mbar
		12h45mn	-0,51	mbar
		16h00mn	-0,35	mbar

Tableau 7 : Hypothèses de la série de mesure N°3

b. Résultats :

Série N°3		Date: 16 avril 2009		
Désignation	Symbole	Heure	Valeurs	Unités
Rendement	η	09h50mn	62	%
		12h45mn	69	%
		16h00mn	63	%
Pertes totales	Pertestot	09h50mn	151	kcal/kg.clinker
		12h45mn	120	kcal/kg.clinker
		16h00mn	144	kcal/kg.clinker
Température du clinker	T_0	09h50mn	268	°C
		12h45mn	124	°C
		16h00mn	215	°C
Température Excès d'air	T_E	09h50mn	305	°C
		12h45mn	302	°C
		16h00mn	323	°C
Vitesse Grille 1	VG1	09h50mn	7,8	st/min
		12h45mn	6,9	st/min
		16h00mn	7,3	st/min
Vitesse Grille 2	VG2	09h50mn	9,8	st/min
		12h45mn	10,4	st/min
		16h00mn	11	st/min
Température Capot de chauffe	Tcap	09h50mn	911	°C
		12h45mn	922	°C
		16h00mn	954	°C
Pression refroidisseur	Pref	09h50mn	59	Mbar
		12h45mn	61	Mbar
		16h00mn	61	Mbar
Granulométrie	G	09h50mn	G4	
		12h45mn		
		16h00mn		

Tableau 8 : Résultats de la série de mesure N°3

c. Analyse :

- Les rendements sont moins importants que celui de la série précédente mais reste plus ou moins acceptable par rapport aux performances du refroidisseur.
- Les pertes totales ont considérablement augmenté.
- Les températures sortie clinker ont augmenté mais l'écart entre les deux cotés demeure réduit du fait du maintien de la consigne du grille de 1.25 à 1.5.
- Avec le ratio grille à 1.5 on a limité la vitesse de la grille 1 à 7.5 st/min. Ceci permet de retarder davantage le clinker à ce niveau pour un meilleur refroidissement.
- Avec la consigne de la pression du capot de chauffe à -0.35 sur la dernière expérience on a remarqué une nette augmentation de la température du capot de chauffe de 922°C à 954°C. Avec cette consigne sur la pression du capot de chauffe on a pu dévier une bonne partie de la chaleur récupérée dans le refroidisseur vers le four.
- La nouvelle consigne sur le ratio air de 0.95 s'est manifestée par une augmentation de la température clinker et de la température excès d'air. Ceci peut être expliqué comme une insuffisance de la quantité d'air de refroidissement. Mais cela reste à être vérifier dans les expériences suivantes.
- La granulométrie quant à elle demeure toujours fine rendant toujours difficile le refroidissement. Ce phénomène, ajouté à la consigne du ratio air à 0.95, peuvent être à l'origine de l'augmentation de la température sortie clinker et la température excès d'air.

2.3.4 Série N°4

a. Hypothèses :

Série N°4		Date: 17 avril 2009		
Désignation	Symbole	Heure	Valeurs	Unités
Ratio Grille	RG	10h00mn	1,5	-
		13h00mn	1,5	-
Ratio Air	RA	10h00mn	1	-
		13h00mn	1	-
Pression Capot de chauffe	Pcap	10h00mn	-0,5	mbar
		13h00mn	-0,35	mbar

Tableau 9: Hypothèses de la série de mesure N°4

b. Résultats :

Série N°4			Date: 17 avril 2009	
Désignation	Symbole	Heure	Valeurs	Unités
Rendement	η	10h00mn	60	%
		13h00mn	61	%
Pertes totales	Pertestot	10h00mn	159	kcal/kg.clinker
		13h00mn	155	kcal/kg.clinker
Température du clinker	T_0	10h00mn	239	°C
		13h00mn	247	°C
Température Excès d'air	T_E	10h00mn	324	°C
		13h00mn	317	°C
Vitesse Grille 1	VG1	10h00mn	7	st/min
		13h00mn	7,2	st/min
Vitesse Grille 2	VG2	10h00mn	10,4	st/min
		13h00mn	10,8	st/min
Température Capot de chauffe	Tcap	10h00mn	938	°C
		13h00mn	956	°C
Pression refroidisseur	Pref	10h00mn	62	Mbar
		13h00mn	62	Mbar
Granulométrie	G	10h00mn	G1	
		13h00mn		

Tableau 10: Résultats de la série de mesure N°4

c. Analyse :

- Les rendements pour cette série sont relativement faibles.
- Les pertes totales ont considérablement augmenté au point de doubler la valeur standard.
- Les températures sorties clinker aussi ont considérablement augmenté mais toujours l'écart de température entre les deux cotés du refroidisseur demeure amoindri.
- La température de l'excès d'air a diminué de la première expérience à la deuxième expérience tandis que la température sortie clinker a augmenté entre les deux expériences. On peut comprendre par là qu'on a eu un transfert de chaleur de l'excès d'air à la sortie clinker.

- La température capot de chauffe a augmenté entre les deux expériences du fait que la consigne de la pression du capot de chauffe est passée de -0.5 mbar à -0.35 mbar. Donc on a pu dévier une partie de la chaleur dans le four en diminuant la pression du capot de chauffe.
- La granulométrie demeure la plus fine de toutes les séries de mesure. Ainsi elle reste la principale cause de la chute du rendement du fait qu'elle a occasionné l'augmentation de la température en rendant difficile le refroidissement.

2.3.5 Série N°5

a. Hypothèses :

Série N°5		Date: 21 avril 2009		
Désignation	Symbole	Heure	Valeurs	Unités
Ratio Grille	RG	10h00mn	1,5	-
		13h00mn	1,5	-
		16h00mn	1,5	-
Ratio Air	RA	10h00mn	0,95	-
		13h00mn	0,95	-
		16h00mn	0,95	-
Pression Capot de chauffe	Pcap	10h00mn	-0,5	mbar
		13h00mn	-0,35	mbar
		16h00mn	-0,35	mbar

Tableau 11: Hypothèses de la série de mesure N°5

b. Résultats :

Série N°5		Date: 21 avril 2009		
Désignation	Symbole	Heure	Valeurs	Unités
Rendement	η	10h00mn	65	%
		13h00mn	71	%
		16h00mn	68	%
Pertes totales	Pertestot	10h00mn	138	kcal/kg.clinker
		13h00mn	115	kcal/kg.clinker
		16h00mn	127	kcal/kg.clinker
Température du clinker	T_0	10h00mn	157	°C

		13h00mn	89	°C
		16h00mn	113	°C
		10h00mn	331	°C
Température Excès d'air	T _E	13h00mn	312	°C
		16h00mn	331	°C
		10h00mn	6,5	st/min
Vitesse Grille 1	VG1	13h00mn	6,5	st/min
		16h00mn	7,2	st/min
		10h00mn	9,6	st/min
Vitesse Grille 2	VG2	13h00mn	9,7	st/min
		16h00mn	9,7	st/min
		10h00mn	967	°C
Température Capot de chauffe	T _{cap}	13h00mn	980	°C
		16h00mn	999	°C
		10h00mn	60	mbar
Pression refroidisseur	Pref	13h00mn	61	mbar
		16h00mn	63	mbar
		10h00mn	G2	
Granulométrie	G	13h00mn		
		16h00mn		

Tableau 12: Résultats de la série de mesure N°5

c. Analyse :

- Les rendements ont relativement augmenté au point que la deuxième expérience présente l'un des meilleurs rendements de toutes les expériences.
- Les températures sortie clinker ont largement diminué avec toujours la deuxième expérience qui donne la plus basse température de toutes les séries.
- Les températures excès d'air quant à elles demeurent toujours élevées même si les rendements paraissent importants.
- Les températures capot de chauffe ont largement augmenté pour atteindre les plus grandes valeurs de toutes les séries. En outre, on a vu que cette température capot de chauffe augmente conjointement avec la baisse de la pression capot de chauffe. Donc on peut dire la diminution de la pression capot implique systématiquement une augmentation de la température capot de chauffe.
- La granulométrie reste toujours fine mais n'a pas empêché cette fois-ci d'avoir une basse température de la sortie clinker. Ceci s'explique par les très faibles valeurs des vitesses des grilles. Autrement dit on a exposé le clinker au refroidissement pendant

un temps assez long pour qu'il puisse bien se refroidir. Ces faibles valeurs des vitesses des grilles peut être aussi expliquées par la forte pression au niveau du refroidisseur (Pref = 63 mbar).

- Pour l'air de refroidissement, on a amené le ventilateur 441FN300 en manuel et maintenir le ratio à 0.95 pour les trois autres ventilateurs. On voit ici qu'on a diminué la quantité d'air de refroidissement et le rendement est bon. Cela veut dire qu'il faut refroidir à 100% le débit sur la grille fixe avant de convoyer le clinker.

2.3.6 Série N°6

a. Hypothèses :

Série N°6		Date: 27 avril 2009		
Désignation	Symbole	Heure	Valeurs	Unités
Ratio Grille	RG	10h00mn	1,5	-
		13h00mn	1,5	-
		15h30mn	1,5	-
		17h00mn	1,5	-
Ratio Air	RA	10h00mn	0,95	-
		13h00mn	0,95	-
		15h30mn	0,9	-
		17h00mn	0,9	-
Pression Capot de chauffe	Pcap	10h00mn	-0,5	mbar
		13h00mn	-0,35	mbar
		15h30mn	-0,35	mbar
		17h00mn	-0,5	mbar

Tableau 13 : Hypothèses de la série de mesure N°6

b. Résultats :

Série N°6		Date: 27 avril 2009		
Désignation	Symbole	Heure	Valeurs	Unités
Rendement	η	10h00mn	64	%
		13h00mn	70	%
		15h30mn	64	%
		17h00mn	61	%
Pertes totales	Pertestot	10h00mn	140	kcal/kg.clinker
		13h00mn	120	kcal/kg.clinker
		15h30mn	140	kcal/kg.clinker

		17h00mn	153	kcal/kg.clinker
Température du clinker	T_0	10h00mn	158	°C
		13h00mn	150	°C
		15h30mn	197	°C
		17h00mn	200	°C
Température Excès d'air	T_E	10h00mn	330	°C
		13h00mn	289	°C
		15h30mn	335	°C
		17h00mn	355	°C
Vitesse Grille 1	VG1	10h00mn	7,2	st/min
		13h00mn	6,9	st/min
		15h30mn	7	st/min
		17h00mn	7	st/min
Vitesse Grille 2	VG2	10h00mn	10,3	st/min
		13h00mn	10,3	st/min
		15h30mn	10,5	st/min
		17h00mn	10,5	st/min
Température Capot de chauffe	T_{cap}	10h00mn	926	°C
		13h00mn	946	°C
		15h30mn	954	°C
		17h00mn	952	°C
Pression refroidisseur	Pref	10h00mn	61	Mbar
		13h00mn	61	Mbar
		15h30mn	61	Mbar
		17h00mn	61	Mbar
Granulométrie	G	10h00mn	G7	
		13h00mn		
		15h30mn		
		17h00mn		

Tableau 14: Résultats de la série de mesure N°6

c. Analyse :

- Les rendements sont stables et particulièrement élevés pour la deuxième expérience.
- Les températures sortie clinker tournaient autour de 150°C exceptée la dernière expérience où elles ont atteint les 200°C.
- Les températures excès d'air étaient trop élevées sauf la deuxième expérience qui donne le meilleur rendement avec une température de l'excès d'air de 298°C soit 8°C de plus que la valeur standard.
- Les températures capot de chauffe ont progressivement augmenté de la première expérience à la dernière expérience suivant toujours la loi de variation de la consigne de la pression du capot de chauffe.
- La pression au niveau du refroidisseur est restée constante durant toute la série.
- Le ratio grille à 1.5 permet toujours de diminuer l'écart de température des deux cotés du refroidisseur.

Pression refroidisseur	Pref	10h00mn	58	Mbar
Granulométrie	G	10h00mn	G3	

Tableau 6: Résultats de la série de mesure N°2

c. Analyse :

- Le rendement est relativement élevé.
- Les pertes totales ont considérablement diminué de plus de 35 kcal/kg.clinker par rapport la série précédente.
- Température sortie clinker très basse au point d'être inférieure à la valeur standard. Cette diminution considérable de la température est due à la chute de la température coté EST du refroidisseur diminuant ainsi l'écart de température des deux cotés. Pour en arriver à cette situation il a fallu changer la consigne du Ratio Grille de 1 à 1.25 permettant de retarder la grille 1 par rapport à la grille 2. Ce qui permet de laisser le temps nécessaire au clinker de la grille 1 de refroidir.
- Température excès d'air très basse aussi ($T_e = 298^{\circ}\text{C}$) comparée à la valeur standard.
- Les vitesses des deux grilles sont relativement différentes et ceci à cause de la consigne du ratio grille à 1.25.
- La température du capot de chauffe ($T_{\text{cap}} = 970^{\circ}\text{C}$) n'est pas mal mais peut faire l'objet d'une augmentation comparée à la série précédente.
- La granulométrie est relativement fine compte tenu du fait que parmi toutes les séries de mesure celle-ci est située à la catégorie G3 étant juste plus gros que G1 et G2. Cette finesse du clinker présente des difficultés pour le refroidissement.

2.3.3 Série N°3

a. Hypothèses :

Série N°3		Date: 16 avril 2009		
Désignation	Symbole	Heure	Valeurs	Unités
Ratio Grille	RG	09h50mn	1,25	-
		12h45mn	1,25	-
		16h00mn	1,5	-
Ratio Air	RA	09h50mn	0,95	-
		12h45mn	0,95	-

- La granulométrie est la plus grosse de toutes les séries. Ces résultats de la granulométrie peuvent expliquer le bon refroidissement du clinker qui par suite a donné ces rendements plus ou moins stables.

2.3.7 Série N°7

a. Hypothèses :

Série N°7		Date: 07 mai 2009		
Désignation	Symbole	Heure	Valeurs	Unités
Ratio Grille	RG	10h00mn	1,5	-
		13h00mn	1,5	-
Ratio Air	RA	10h00mn	0,95	-
		13h00mn	0,95	-
Pression Capot de chauffe	Pcap	10h00mn	-0,5	mbar
		13h00mn	-0,35	mbar

Tableau 15 : Hypothèses de la série de mesure N°7

b. Résultats :

Série N°7		Date: 07 mai 2009		
Désignation	Symbole	Heure	Valeurs	Unités
Rendement	η	10h00mn	65	%
		13h00mn	65	%
Pertes totales	Pertestot	10h00mn	137	kcal/kg.clinker
		13h00mn	137	kcal/kg.clinker
Température du clinker	T_0	10h00mn	198	°C
		13h00mn	155	°C
Température Excès d'air	T_E	10h00mn	296	°C
		13h00mn	335	°C
Vitesse Grille 1	VG1	10h00mn	7,1	st/min
		13h00mn	7	st/min
Vitesse Grille 2	VG2	10h00mn	10,6	st/min
		13h00mn	10,1	st/min

Température Capot de chauffe	Tcap	10h00mn	973	°C
		13h00mn	990	°C
Pression refroidisseur	Pref	10h00mn	60	Mbar
		13h00mn	60	Mbar
Granulométrie	G	10h00mn	G5	
		13h00mn		

Tableau 16: Résultats de la série de mesure N°7

c. Analyse :

- Comme dans la série précédente les rendements sont stables avec une moyenne de 65%.
- Pour cette série de mesure on a remarquer que la température sortie clinker et la température excès d'air suivent des lois de variation inverse. C'est pourquoi le rendement est resté constant malgré la chute de la température sortie clinker de 198°C à 155°C alors que la température excès d'air est passé de 296°C à 335°C.
- La température capot de chauffe est passée de 973°C à 990°C au moment où la pression capot de chauffe est passée de -0.5 mbar à -0.35 mbar.
- Les pertes totales sont toujours grandes par rapport à la valeur standard.
- La granulométrie est grosse occasionnant un bon refroidissement du clinker

2.4 Tableau récapitulatif des paramètres du refroidisseur

Date	Heure	η (%)	Pertes totales kcal/kg.clinker	Temp.clinker °C	Temp.E A °C	R. grille	VG1 st/mn	VG2 st/mn	R. air	Pcap mbar	Temp. Cap °C	Press. ref. Mbar	Granulo
19/03/2009	12h55mn	59	159	269	306	1	9,4	9,4	1	-0,5	980	59	G6
	15h00mn	61	153	206	332	1	9,9	9,9	1	-0,51	983	60	
	16h40mn	62	149	165	348	1	9	10,8	1	-0,5	976	60	
20/03/2009	10h00mn	70	118	86	298	1,25	7,1	8,9	1	-0,5	970	58	G3
16/04/2009	09h50mn	61,75	151,54	268,17	305	1,25	7,8	9,8	0,95	-0,5	911	59	G4
	12h45mn	69,5	120,6	123,8	302	1,5	6,9	10,4	0,95	-0,5	922	61	
	16h00mn	63,5	144,82	215,5	323	1,5	7,3	11	0,95	-0,35	954	61	
17/04/2009	10h00mn	59,62	159,5	238,8	324	1,5	7	10,4	1	-0,5	938	62	G1
	13h00mn	60,9	155,12	247	317	1,5	7,2	10,8	1	-0,35	956	62	
21/04/2009	10h00mn	64,98	138,3	157	331	1,5	6,5	9,6	0,95	-0,5	967	60	G2
	13h00mn	71,14	114,6	88,8	312	1,5	6,5	9,7	0,95	-0,35	980	61	
	16h00mn	68,12	126,8	113	331	1,5	6,4	9,7	0,95	-0,35	999	63	
27/04/2009	10h00mn	64,5	140,24	158	330	1,5	7,2	10,3	0,95	-0,5	926	61	G7
	13h00mn	69,6	120,3	150	289	1,5	6,9	10,3	0,95	-0,35	946	61	
	15h30mn	64,17	139,6	197	335	1,5	7	10,5	0,9	-0,35	954	61	
	17h00mn	61,3	153,4	200	355	1,5	7	10,5	0,9	-0,5	952	61	
07/05/2009	10h00mn	65,4	137	198	296	1,5	7,1	10,6	0,95	-0,5	973	60	G5
	13h00mn	65,22	137,7	155	335	1,5	7	10,1	0,95	-0,35	990	60	

Tableau 17 : Récapitulatif des paramètres du refroidisseur

2.5 Courbes de tendances

2.5.1 Courbes de granulométrie

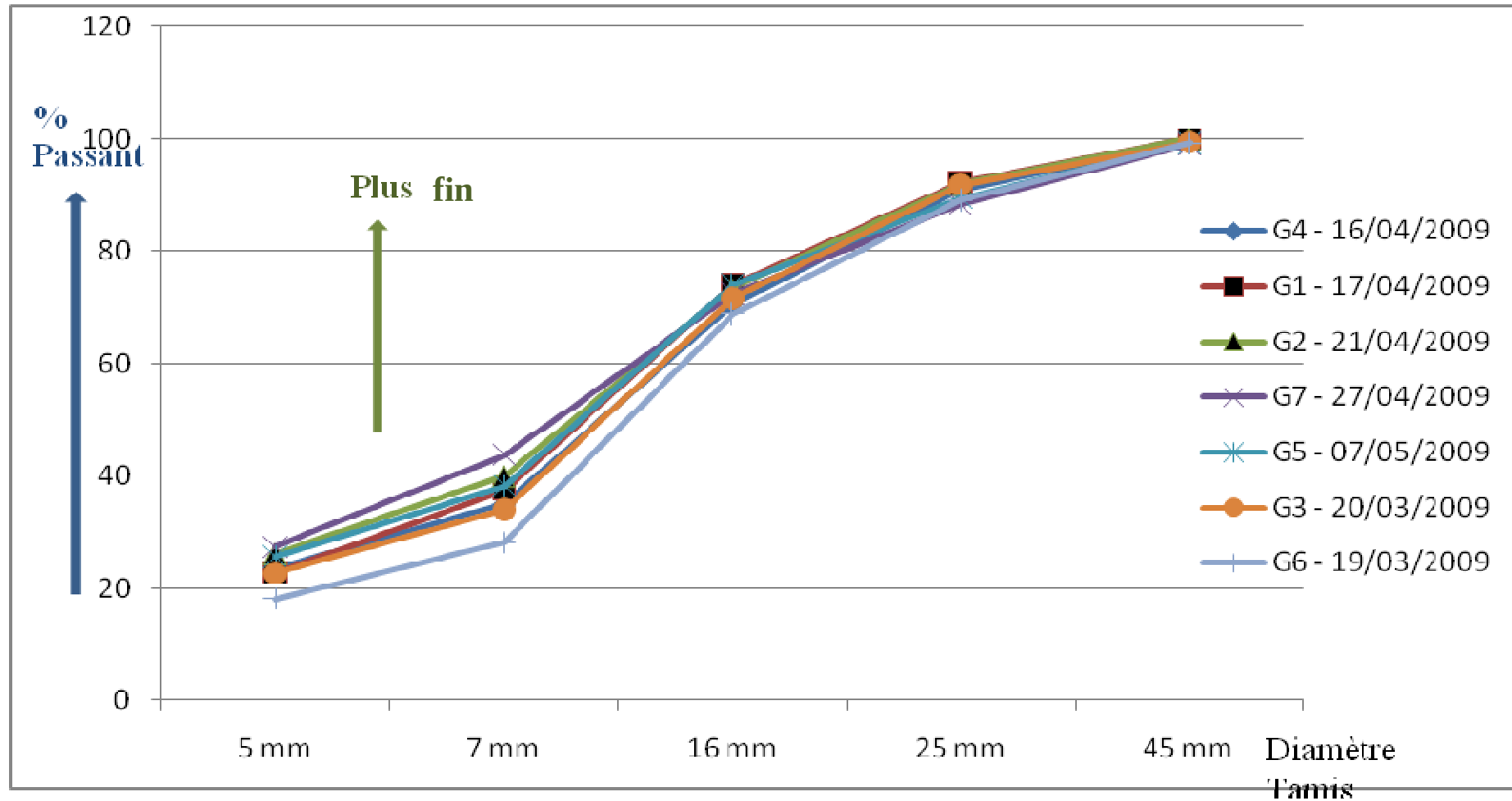


Figure 7 : Courbes de granulométrie des différentes mesures

2.5.2 Courbes récapitulatives des caractéristiques du refroidisseur

2.5.2.1 Courbe de la granulométrie G1 :

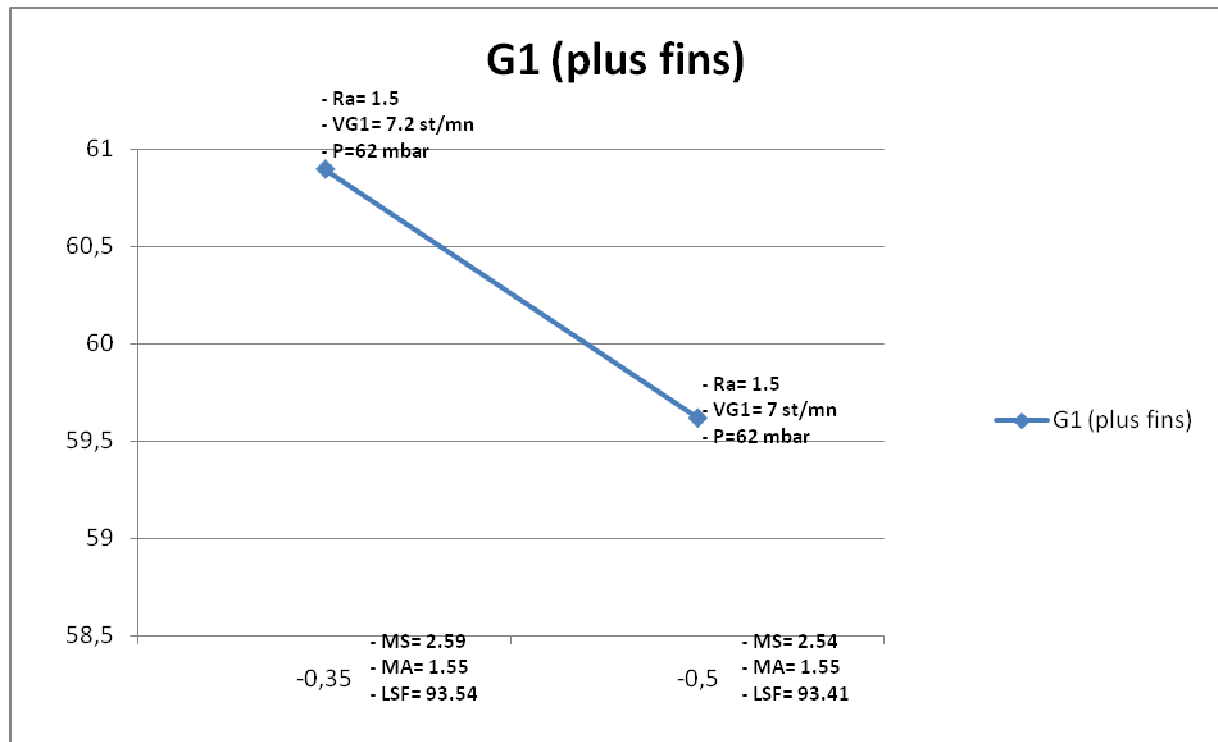


Figure 8 : Paramètres du refroidisseur pour la granulométrie G1

2.5.2.2 Courbe de la granulométrie G2 :

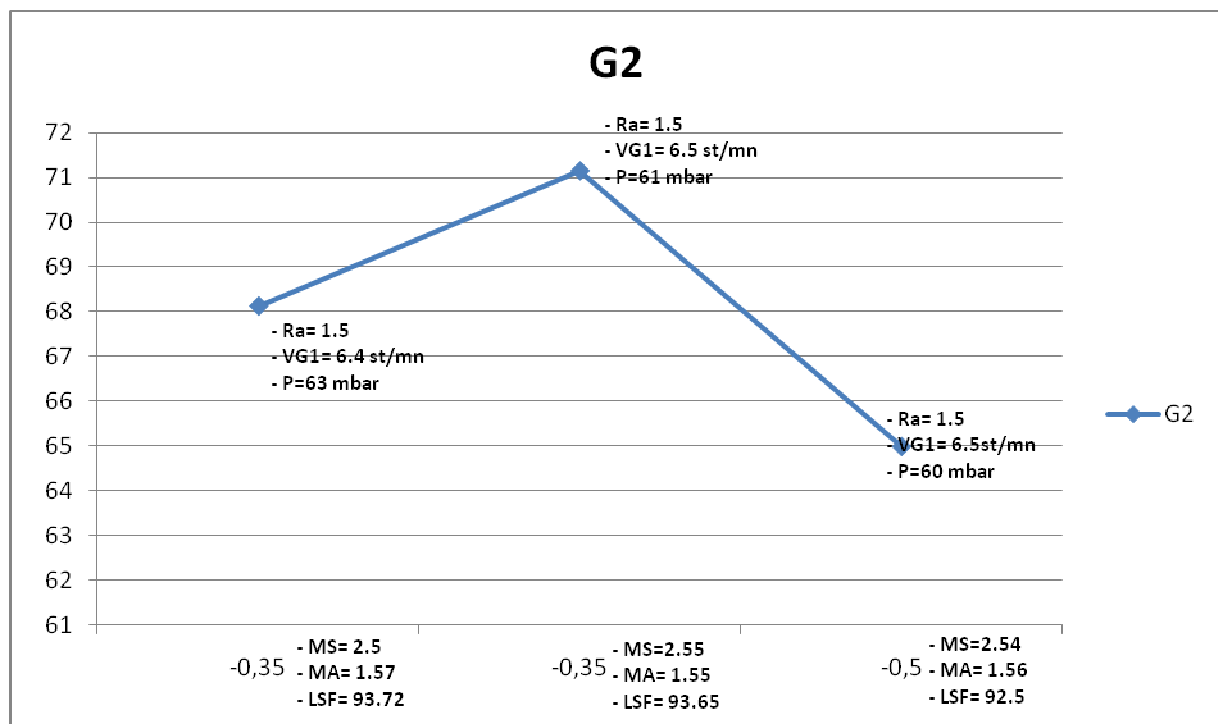


Figure 9 : Paramètres du refroidisseur pour la granulométrie G2

2.5.2.3 Courbe de la granulométrie G4 :

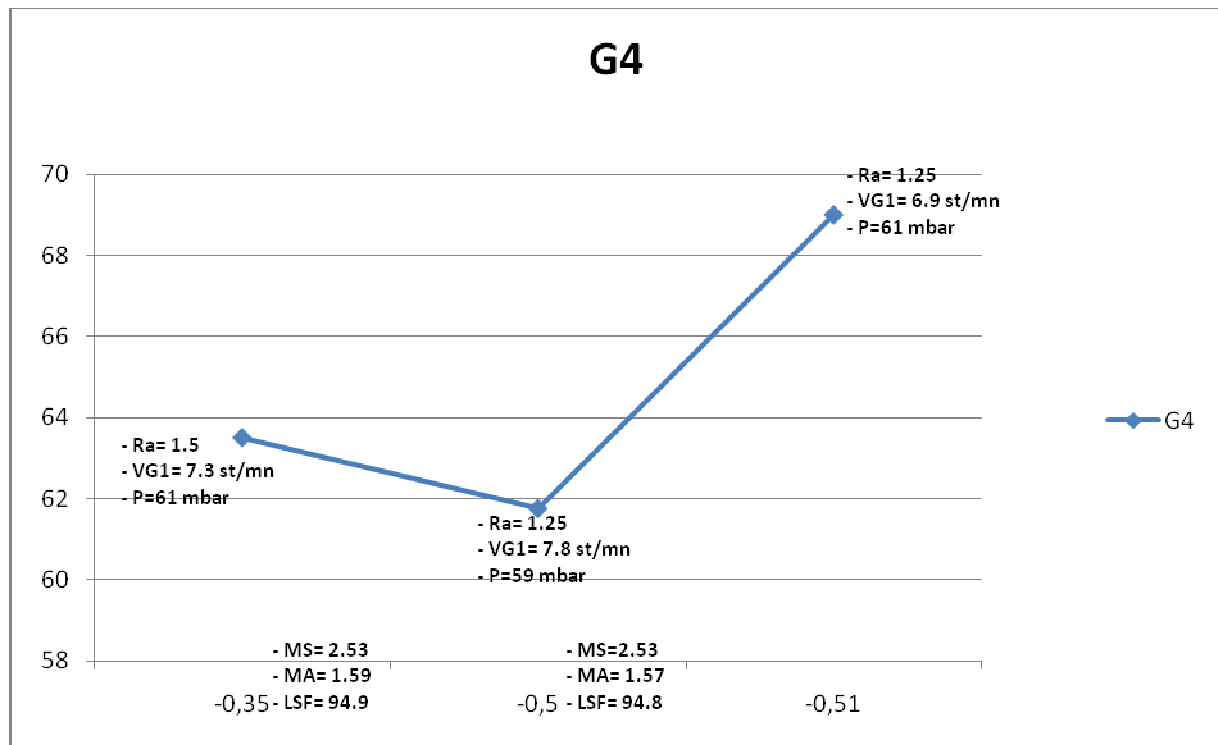


Figure 10 : Paramètres du refroidisseur pour la granulométrie G4

2.5.2.4 Courbe de la granulométrie G5 :

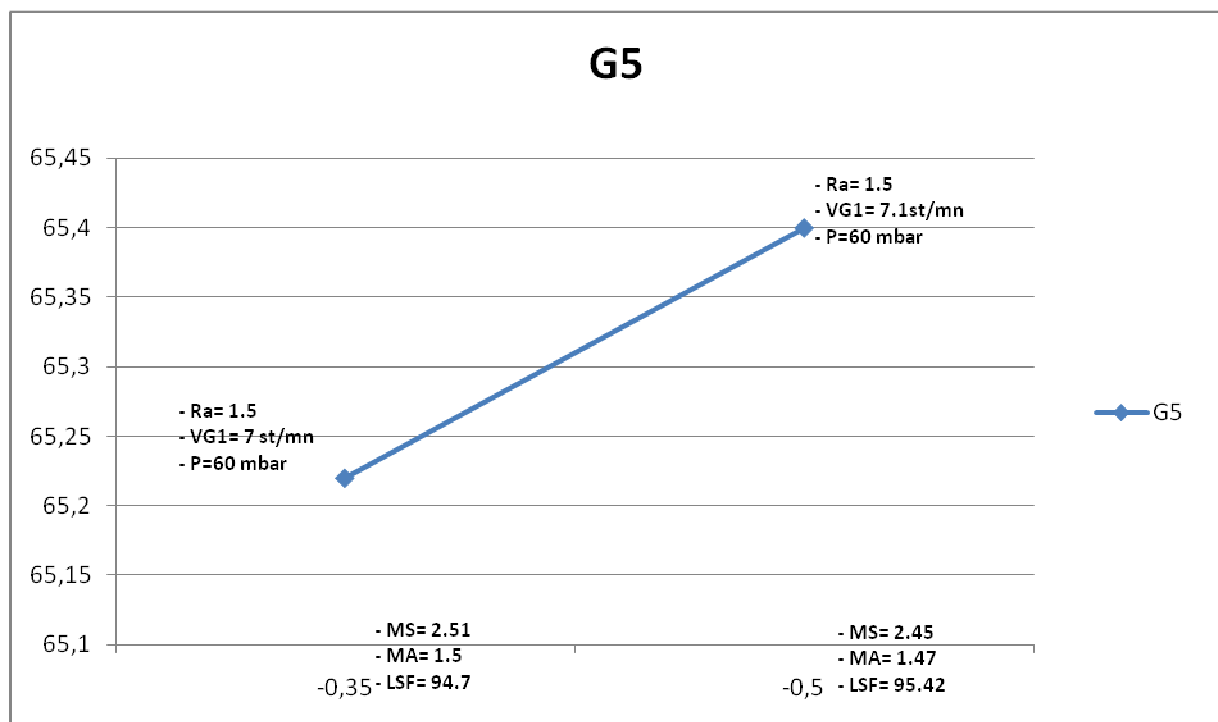


Figure 11 : Paramètres du refroidisseur pour la granulométrie G5

2.5.2.5 Courbe de la granulométrie G6 :

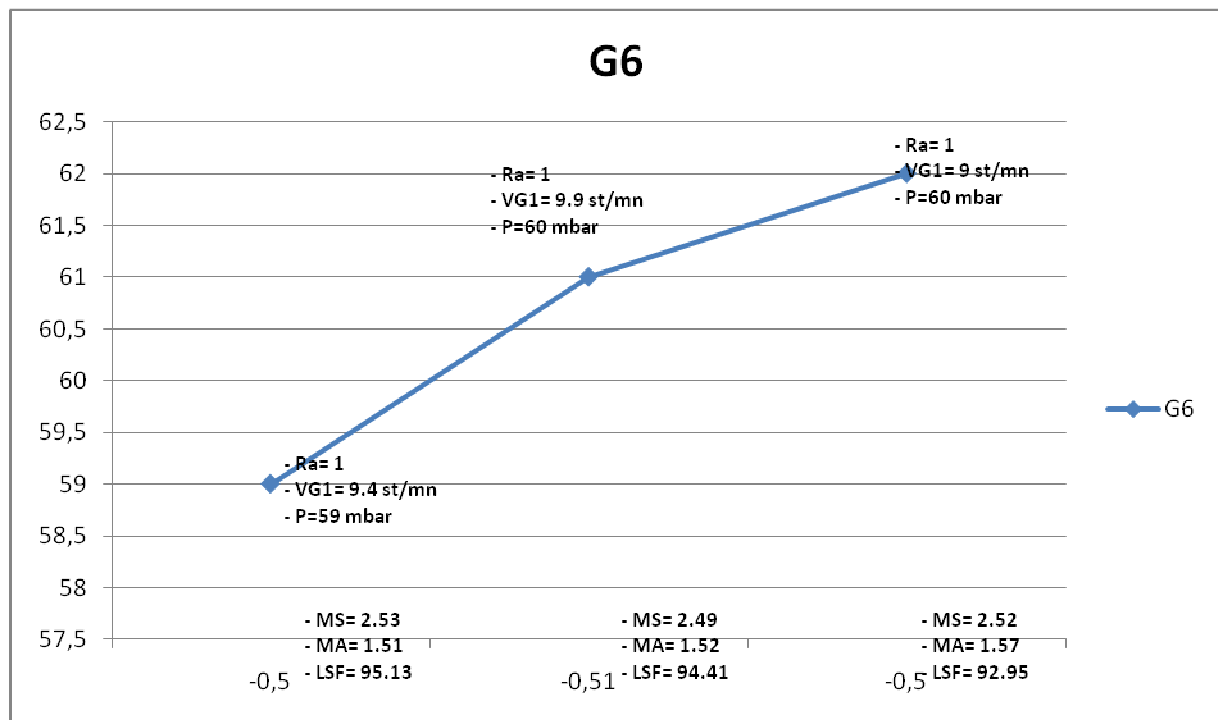


Figure 12 : Paramètres du refroidisseur pour la granulométrie G6

2.5.2.6 Courbe de la granulométrie G7 :

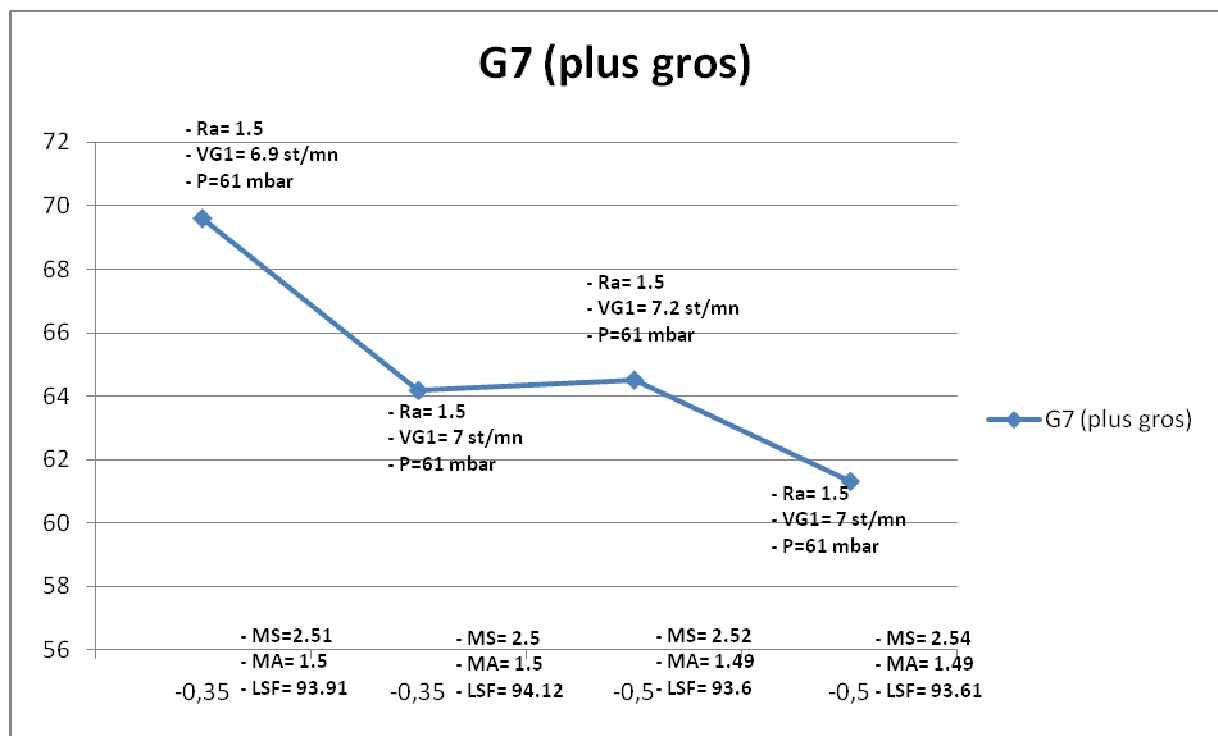


Figure 13 : Paramètres du refroidisseur pour la granulométrie G7

2.6 Interprétation des expériences

2.6.1 Ratio Grille

Le ratio grille est la consigne qui assure la boucle de régulation des vitesses des grilles. En effet dans le refroidisseur, nous avons deux grilles qui assurent le transport du clinker par mouvements alternatifs générés par des vérins. Par ailleurs, selon le sens de rotation du four, on a une répartition du clinker selon la taille de part et d'autre du refroidisseur. Autrement dit l'une des grilles va transporter essentiellement du clinker fin et l'autre essentiellement du clinker gros. Et pour notre cas c'est la grille 1 qui transporte le clinker fin et la grille 2 le clinker gros. Or, nous savons de par la théorie du refroidissement que le clinker fin est plus difficilement refroidi que le gros clinker du fait que l'air a du mal à traverser la couche de clinker fin. Cette théorie est confirmée par les premières prises de mesure qui donnaient de grands écarts entre les températures des deux cotés du refroidisseur. Ceci revient à assurer un type de refroidissement pour chaque grille. Pour cela on a opté à retarder la vitesse de la grille 1 pour donner plus de temps au clinker fin de se refroidir. La consigne de ratio grille = 1 assure une égalité des deux vitesses des grilles. Plus on augmente cette consigne du ratio grille plus la vitesse de la grille 1 est retardée par rapport à la vitesse de la grille 2. Avec les expériences suivantes on a vu que la consigne de 1.25 a permis de diminuer l'écart de température des deux cotés et cela s'est confirmée en augmentant cette consigne jusqu'à 1.5. En outre on a limité la vitesse de la grille 1 à 7.5 st/min. en combinant ces deux consignes on a vu une nette amélioration de l'écart considérable de température entre les deux cotés du refroidisseur.

2.6.2 Pression Capot de chauffe

Cette consigne assure la dépression au niveau du capot de chauffe. En effet, cette consigne permet la répartition des flux entre l'air secondaire, l'air tertiaire et l'excès d'air. Au début des expériences cette consigne était presque constante à -0.5 mbar. A partir de la troisième série on a commencé à diminuer cette valeur de -0.5 mbar à -0.35 mbar. Ainsi on a vu une nette augmentation de la température capot de chauffe allant parfois jusqu'à 1000°C. Ce qui constitue un gain potentiel pour la combustion au niveau du four. En outre, d'après les courbes récapitulatives des caractéristiques des paramètres du refroidisseur, on a remarqué une chute du rendement à chaque fois que la pression du capot de chauffe passe de -0.35 mbar à -0.5 mbar. Donc cette consigne aussi influe sur le rendement de manière générale.

2.6.3 Ratio Air

Cette consigne assure la régulation de l'air de refroidissement provenant des quatre ventilateurs. En effet, l'air de refroidissement est assuré par quatre ventilateurs qui offre chacun un débit d'air bien défini. Ces débits d'air sont synchronisés à travers une boucle de régulation permettant, à partir de la seule consigne du ratio air, d'imposer à chaque ventilateur un débit. Mais le constat lorsqu'on commencé les mesures était que cette consigne était toujours à 1 et les ventilateurs étaient presque à 100% quelque soit l'état du refroidisseur. Ce qui paraissait anormale. Ainsi on a commencé par diminué cette consigne à 0.95 ensuite à 0.9. Après on a sorti le premier ventilateur de la grille fixe de la boucle de régulation en l'amenant en mode manuel et laissé les trois autres dans la boucle de régulation. On a compris de par les résultats que ces ventilateurs ne doivent pas toujours débiter à leur puissance maximale. Mais il faut admettre qu'on n'a pas trop poussé cette hypothèse pour en donner la bonne interprétation.

2.7 Simulation de gain sur la consommation du charbon

L'optimisation de la récupération d'énergie thermique se manifeste par une augmentation du rendement et une diminution des pertes totales. Ceci implique systématiquement une diminution de la consommation du charbon du fait de la température élevée de l'air de combustion.

Pour illustrer ce phénomène de gain nous avons considéré une valeur du rendement à la première série (avant optimisation) et une valeur de la dernière série (après optimisation) pour calculer la masse de charbon économisée.

Applications :

- Avant optimisation : $\eta = 61\%$; Pertes refroidisseur = 157 kcal /kg.clinker
- Après optimisation : $\eta = 65\%$; Pertes refroidisseur = 137 kcal/kg.clinker

$$\Delta \text{Pertes} = 30 \text{ kcal/kg.clinker}$$

$$\text{Or le PCI du charbon} = 6100 \text{ kcal/kg}$$

Donc la masse de charbon économisée est :

$$m_{\text{charbon}} = \Delta / \text{PCI} = 30 / 6100 = 3300 \text{ kg/tonne de clinker}$$

SOIT 1800 TONNES DE CHARBON/ANNEE

CHAPITRE 3 : CONCEPTION DU MOTEUR DE CALCUL AUTOMATISE

3.1 Introduction de Visual Basic sous Excel

3.1.1 Historique de VBA⁵

VBA est l'acronyme de Visual Basic pour Applications et on rencontre parfois la dénomination Visual Basic Edition Application qui est tombée en désuétude. Il s'agit donc d'une version de Visual Basic pour les applications. Le langage de programmation Basic est un langage assez ancien qui a été créé en 1965 ; langage d'initiation (***Basic signifie Beginner's All-purpose Symbolic Instruction Code***), il a connu d'innombrables versions sur la plupart des systèmes d'exploitation.

Avec l'avènement de Windows, les interfaces utilisateur sont devenues graphiques et Microsoft se devait de faire évoluer son Basic : c'est ainsi que Microsoft Basic est devenu Visual Basic. Simple et visuelle, cette nouvelle version du langage obtint un succès formidable et encore aujourd'hui Visual Basic est sans doute le langage de programmation le plus utilisé sur la planète. On a vu apparaître en 1993 une version minimale de Visual Basic dans Excel et cette version fut appelée VBA. Puis ce fut le tour de Project et d'Access d'accueillir VBA. En 1996, sortit la version 4 de Visual Basic et VBA remplaça Word Basic. Une année plus tard, la version 5 de Visual Basic vit le jour et chaque application de la suite Office 97 (à l'exception d'Outlook) incorporait désormais une version de VBA même si de légères différences entre les applications subsistaient encore. En 1998, Microsoft livra Visual Basic 6 et c'est cette version qui est présente au sein d'Office 2000. Pour la première fois Basic règne en maître sur toutes ces applications. En maîtrisant Basic qui n'a plus grand-chose à voir avec le Basic des origines, on peut développer sous Word, Excel, Access, PowerPoint, FrontPage, Outlook, Project et Visio.

3.1.2 Différence entre Visual Basic et VBA

La principale différence entre Visual Basic et VBA réside dans le fait que VBA a besoin d'une application hôte pour pouvoir exécuter ses programmes. Les applications hôtes de VBA sont essentiellement les applications de la suite Office mais d'autres programmes, comme Autocad, peuvent servir d'application hôte de VBA. Si vous écrivez une macro en VBA pour Word, vous devez absolument posséder Word pour faire tourner votre programme. En revanche, si vous écrivez un programme en Visual Basic, vous pouvez le compiler afin de produire un fichier exécutable autonome qui pourra être lancé sur un ordinateur qui ne dispose

pas de Visual Basic. A cette différence près, les deux langages sont extrêmement proches et il est particulièrement aisé de passer de l'un à l'autre.

Le langage VBA est accessible à tous. Cependant, une bonne connaissance d'Excel est nécessaire avant de se lancer dans la création d'application. En effet, il est important de bien maîtriser les principaux objets que manipule VBA, comme les objets Workbook (classeur), Worksheet (Feuille de calcul), Range (plage de cellule), etc.

VBA Excel est un langage de programmation orienté objet, même s'il ne dispose pas de toutes les fonctionnalités des langages de ce type. La plupart des éléments manipulés dans Excel sont des objets : les classeurs, les feuilles de calcul, les plages de cellule, les cellules.

Les objets sont organisés selon un modèle hiérarchique : certains objets contiennent d'autres objets qui peuvent eux-mêmes en contenir d'autres.

Ces objets sont appelés conteneurs ou objets parent. Par exemple l'objet Application est le conteneur des objets Workbook (classeur ouverts dans Excel), qui sont eux-mêmes les conteneurs des objets Worksheet (feuilles de calcul d'un classeur). Le conteneur le plus vaste est l'objet Application : c'est ce qu'on appelle le principe d'héritage.

Un ensemble d'objet de même nature constitue une collection (collection Workbook : ensemble de classeurs ouverts dans Excel, collection Worksheet : ensemble des feuilles de calcul d'un classeur).

Un objet dispose d'un ensemble de caractéristiques appelés propriétés (par exemple pour l'objet Application : la propriété UserName représente le nom de l'utilisateur, la propriété Version renvoie le numéro de version de Microsoft Excel) et de comportements ou actions appelés méthodes (par exemple, toujours pour l'objet Application, la méthode Findfile affiche la boîte de dialogue Ouvrir, la méthode Quit quitte Excel...).

3.1.3 Guide d'utilisation du moteur de calcul

Ce moteur de calcul est un progiciel qui permet, à partir des données saisies, de calculer puis afficher les valeurs des différents paramètres du refroidisseur.

La procédure d'utilisation est décrite comme suit :

-  Double cliquer sur le fichier Excel pour ouvrir le progiciel.
-  Une boîte de dialogue s'affiche pour demander un mot de passe avant de continuer.
-  Si le mot de passe saisi par l'utilisateur est incorrect la boîte de dialogue affiche le message suivant : « vous n'êtes pas autorisé à continuer, cette application va se fermer »

- ✚ Une fois que le mot de passe est entré appuyer sur OK puis une autre boîte de dialogue s'ouvre et affiche le message suivant « bienvenue au refroidisseur ».
- ✚ Un click sur OK nous amène à la page principale où on a trois boutons de commande (Saisie – Refroidisseur – Enregistrer)
- ✚ On click d'abord sur le bouton de commande « Saisie » pour entrer de nouvelles valeurs.
- ✚ Après avoir fini d'entrer les valeurs, cliquer sur le bouton « calcul » puis revenir à la page principale
- ✚ Cliquer sur le bouton « enregistrer » pour entrer votre nom.
- ✚ Cliquer sur le bouton « Refroidisseur » pour visualiser les paramètres du refroidisseur.
- ✚ Revenir à la page principale puis fermer le fichier.
- ✚ Ainsi le fichier que vous venez de fermer est enregistré au niveau des archives et peut faire l'objet d'une consultation ultérieure.

✓ **Synoptique de la page principale**

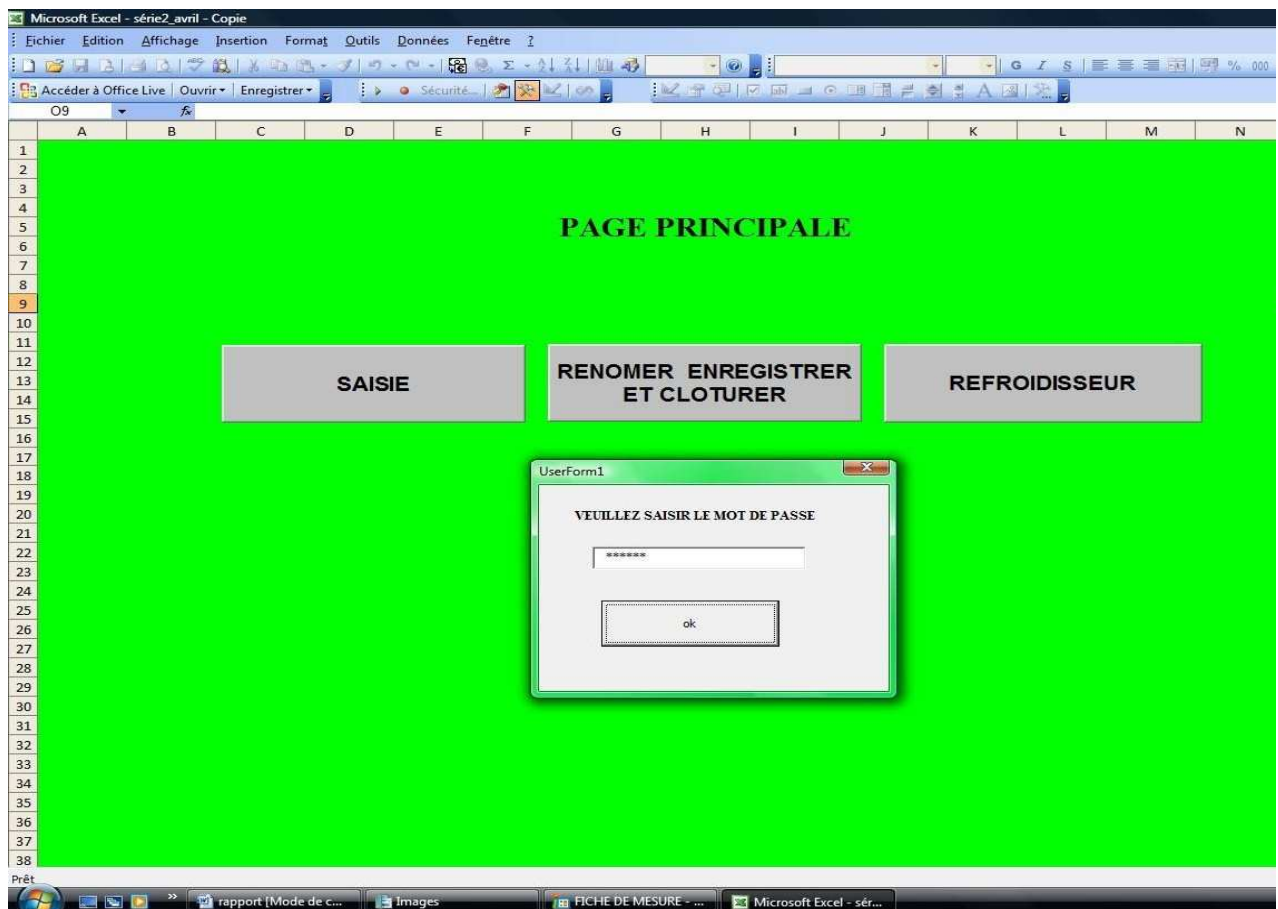


Figure 14 : Synoptique de la page principale

Sujet : Conception d'un moteur de calcul automatisé pour l'optimisation de la récupération de l'énergie thermique au niveau du refroidisseur clinker

✓ **Synoptique de la page de saisie**

Paramètre	Unité	Valeur
Vitesse d'aspiration ventilateur FN300	m/s	20
Vitesse d'aspiration ventilateur FN310	m/s	26
Vitesse d'aspiration ventilateur FN320	m/s	26
Vitesse d'aspiration ventilateur FN330	m/s	20
Puissance ventilateur FN030	kW	46
Vitesse ventilateur FN030	%	70
Puissance ventilateur FN310	kW	66
Vitesse ventilateur FN310	%	99
Température de la virole	°C	73
Température air ambiant	°C	30
Température sortie refroidisseur	°C	156
Température excès d'air	°C	347
Débit de clinker	kg/h	74200
Densité	kg/Nm³	1.2
Surface	m²	123
Pression au niveau du refroidisseur	mbar	60
Vitesse grille 1	st/min	9.3
Vitesse grille 2	st/min	8.1
Température capot de chauffe	°C	972
Pression Capot de chauffe	mbar	-0.5
Module de clinker		2.55
Module de clinker		1.47
Module de clinker		94.62
Granulométrie		G1
Ratio grille		1
Ratio air		1
Puissance du ventilateur 1	kW	231
Puissance du ventilateur 2	kW	231
Puissance du ventilateur 3	kW	231
Puissance du ventilateur 4	kW	231

Figure 15: Synoptique de la page de saisie des paramètres

✓ **Synoptique de la vue d'ensemble du refroidisseur**

PARAMETRES DU REFROIDISSEUR ET FLUX D'ENERGIE

Paramètre	Valeur	Unité
Temps de refroidissement	30	°C
Pression capot de chauffe	-0.5	mbar
Température capot de chauffe	972	°C
Ratio grille 1	1	
Vitesse grille 1	9.3	st/min
Vitesse grille 2	8.1	st/min
Pression Refroidis.	60	mbar
RA	0.391	kcal/kg.clinker
CON	0.304	kcal/kg.clinker
Pertes refroidisseur	143.6	kcal/kg.clinker
Ta	30	°C
Ma	1.85	kgair/kgclinker
Rair	1	
standard	347	kgair/kgclinker
QN1	266	Nm³/h
QN2	560	Nm³/h
QN3	560	Nm³/h
QN4	431	Nm³/h
PN1	231	kW
PN2	231	kW
PN3	231	kW
PN4	231	kW
Qclink	74200	kg/h
Tcl	156	°C
Pc	30.330	kcal/kg.clinker
Pc	21.11	%
Pc	142.92	
RVAT	1817	Nm³/h
DMAT	2335	kg/h
DSAT	3.14	kgair/kgclinker
Pelec	924	kW
Pelec	1.245	kW/kgclinker

Rendement 62.48 %

Figure 16: Synoptique de la vue d'ensemble du refroidisseur

CONCLUSION

Au terme de notre analyse dans cette partie nous avons pu nous familiariser avec les outils d'expérimentation pour effectuer la caractérisation et l'optimisation du refroidisseur. Les premières séries de mesures nous ont permis d'avoir une idée sur le fonctionnement habituel du refroidisseur. Et ces résultats nous ont confortés dans notre idée de vouloir procéder à l'optimisation les conditions de marche du refroidisseur dans la mesure où nous nous sommes rendu compte que les rendements obtenus étaient inférieurs aux valeurs standards du refroidisseur.

A l'étape d'optimisation nous avons remarqué une nette amélioration du rendement suivant la variation de certains paramètres du refroidisseur. Ainsi, certaines conclusions ont pu être tirées et devaient faire l'objet d'application dans l'avenir de la gestion du refroidisseur.

Cependant, il faut noter qu'on n'a pas pu procéder à plusieurs expériences pour apporter des conclusions définitives car ces premières conclusions obtenues devaient faire l'objet de confirmation par d'autres expériences

Paramètres retenus :

- **Ventilateur FN300 en manuel à 100%**
- **Pression capot de chauffe $P_{cap} = -0.35$**
- **Ratio Air : $R_a = 0.95$**
- **Ratio Grille : $R_g = 1$**
- **V_{max} de la grille 1 = 7.5 st/min**

CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Au terme de notre analyse nous avons pu procéder à l'optimisation de la récupération d'énergie thermique au niveau du refroidisseur clinker. En effet, les résultats des expériences nous ont permis d'aboutir à des conclusions qui doivent faire l'objet d'application afin d'optimiser la récupération d'énergie thermique au niveau du refroidisseur. En outre de cette optimisation, ces résultats permettront, désormais, aux opérateurs de maîtriser davantage les conditions de marche du refroidisseur. La conception du moteur de calcul avec la programmation sous Visual Basic permettra, à l'aide des données, de calculer le rendement et d'afficher tous les paramètres du refroidisseur et principalement les valeurs des pertes à chaque niveau du refroidisseur. Ceci aidera à la prise de bonnes décisions relatives au bon fonctionnement du refroidisseur. Ce sujet nous a permis d'une part d'acquérir beaucoup d'expériences sur les questions énergétiques au niveau des cimenteries et d'autre part de se familiariser avec l'outil de programmation Visual Basic qui est un outil très utile dans les systèmes d'acquisition de données.

Par ailleurs les résultats cette étude nous conduisent à émettre quelques recommandations dans l'optique d'une amélioration de ce travail et d'une continuité du projet.

- Les résultats des séries doivent faire l'objet de confirmation en augmentant le nombre de série de mesure.
- Les mesures sur le refroidissement des quatre ventilateurs doivent être approfondies pour préciser davantage les conclusions sur ces paramètres.
- Les expériences sur la granulométrie doivent être poursuivies pour évaluer son impact sur le rendement du refroidisseur.
- On doit procéder à la synchronisation du moteur de calcul avec le process afin que les valeurs de saisie puissent être directement prises au niveau du process et à temps réel.

REFERENCES

Bibliographie :

1. **FLSmidth institute** – « Cours de Production volume 2 » – **Edition 2005**
2. **FLSmidth institute** – « Maintenance Mécanique volume 6 » – **Edition 2005**
3. **FLSmidth institute** – « The International Cement Production Seminar volume IA »
Edition 2005
4. **Ataba SAMBOU et Binta THIAM** – Projet de Fin d'Etudes à l'Ecole Polytechnique de Thiès « Amélioration des opérations de conduite de l'atelier broyage ciment et conception d'un moteur de calcul automatisé et synoptiques pour la ligne cuisson » -
Année 2008
5. **Dominique Maniez** – « FORMATION A..... VBA pour Word, Excel, Access »
Edition 2004

Webographie :

6. www.ciment.ca décembre 2008
7. <http://www.portcement.org> décembre 2008
8. <http://www.cembureau.be> janvier 2009
9. <http://www.infociments.fr> février 2009

ANNEXES

Annexe 1 : Fiche de mesure

Date: 20-03-09

Heure: 15h40mn

FICHE DE MESURE:N°11

	VITESSE (m/s)				Vmoy (m/s)	Tamb. °C	Pression Dynamique (mmH2O)				Pdmoy	vitesse calculée (mmH2O)	Ps (mmH2O)	ρ
	Point1	Point2	Point3	Point4			Point1	Point2	Point3	Point4				
FN300	14,6	20,8	18,3	16,1	18,34989	30	6	40	37	31	35,9004	24,67611445	43	1,15679
FN310	26,1	27,1	22,5	23,4	24,29352	34,8	-4	105	119	111	111,5933	43,61301685	155	1,15111
FN320	16,8	26,4	28,3	25,5	26,7207	29,9	-3	81	84	83	82,66195	37,3400978	97	1,16323
FN330	10,3	19,2	22,6	18,1	19,92175	31,2	4	48	62	58	55,84067	30,77811293	82	1,15658

Annexe 2 : Rapport du test de granulométrie du laboratoire



**Département contrôle Qualité
Laboratoire de physique**

Date : le 23/10/2008

Clinker CDS

Granulo Clinker silo incuit

**T° : °C 186
PL (g/l): 1098
Masse(Kg): 24,945**

Tamis	Masses	%Refus	Refus cumulés
>45mm	0,000	0,00%	0,00%
>25mm	1,390	5,57%	5,57%
>16mm	3,630	14,55%	20,12%
>7mm	8,950	35,88%	56,00%
>5mm	3,540	14,19%	70,19%
<5mm	7,253	29,08%	
Total			99,27%

Annexe 3 : Rapport des paramètres du refroidisseur sur le logiciel Plant Guide

 LES CEMENTS DU SAHEL S.A. CIMENTERIE DE KIRENE 600'000 TONNES/AN	Direction d'exploitation Département Production	Nom du rapport: _1_PFE_2009 Description:

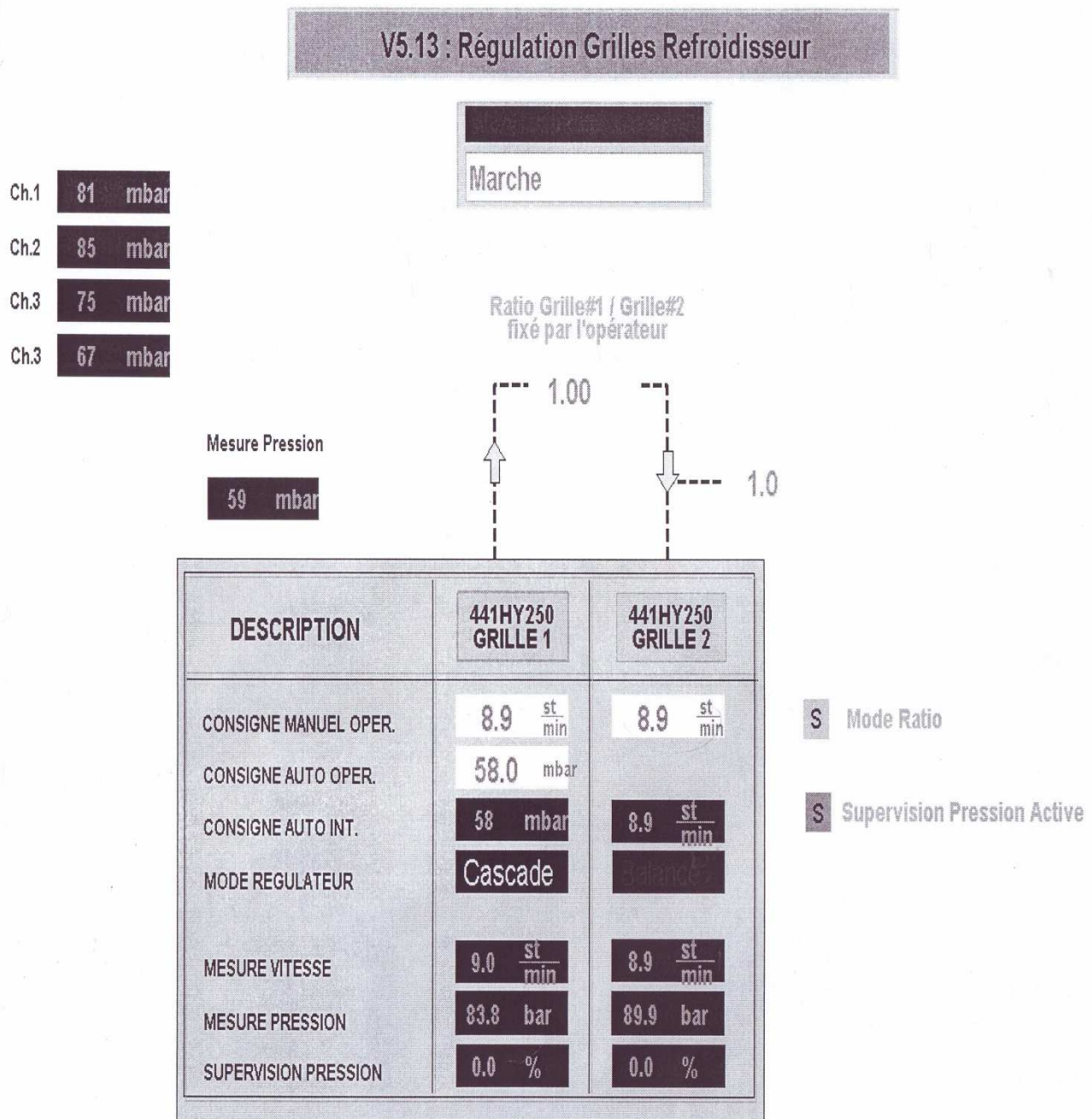
Heure	vitesseFN030	PuissanceFN030	Vitesse FN300	Vitesse FN310	Vitesse FN320	Vitesse FN330	Puissance FN300	Puissance FN310
<Tag ECS>	442FN030U01S01	442FN030U01I01	441FN300U01S01	441FN310U01S01	441FN320U01S01	441FN330U01S01	441FN300U01I01	441FN310U01I01
<Val Maxi>	100	164	100	100	100	100	100	100
15:00 - 16:00	60,	31,	92,	97,	94,	89,	67,	72,
16:00 - 17:00	61,	33,	93,	97,	94,	89,	69,	72,

Temp capot chauffe	Pression capot chauffe	Ratio grille	Ratio air	Pression FN300	Pression FN310	Pression FN320	Pression FN330
431KH200N01T01	431KH200N02P01	441HY250I01R13	441CC100I01S11	441FN300N02P01	441FN310N02P01	441FN320N02P01	441FN330N02P01
1200	3	2	2	100	100	100	100
958,	-0,36	1,50	0,90	75,	77,	65,	58,
947,	-0,51	1,50	0,90	78,	78,	65,	58,

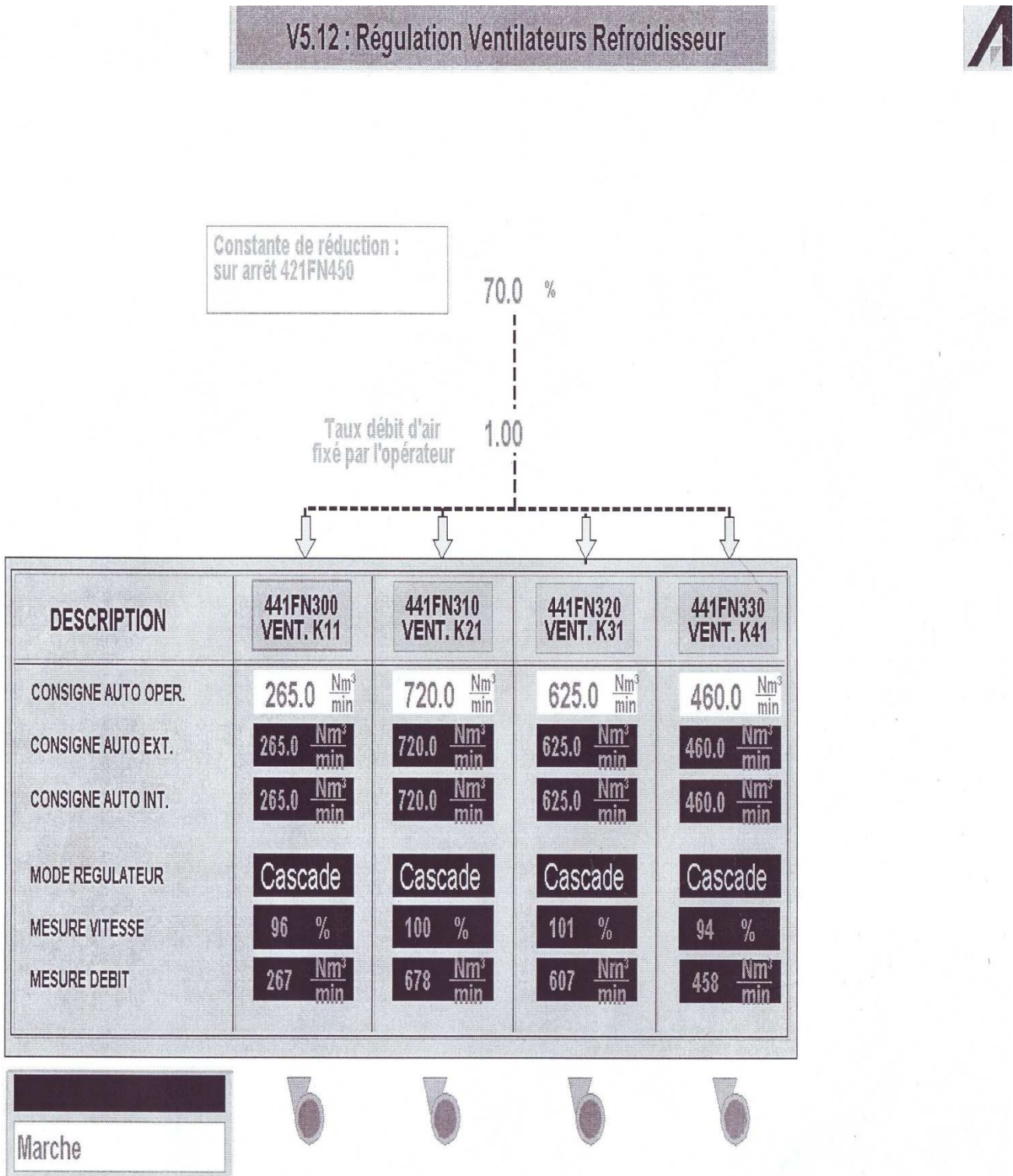
Heure	oxygen BF	O2 cyclone 1	Vitesse Four	Température clinker AC0	Débit Farine	MS FarineCrue	MA FarineCrue
	421AM900A01A01	421AM901A01A01	431KL100A01S01	411PYR02A01T01	361BI060A01F01	QCXH1SIM	QCXH1ALM
	22,00	22,00	4,00	200,00	150,00	3,00	2,00
15:00 - 16:00	4,2	4,3	3,56	129,	109,2	2,58	1,38
16:00 - 17:00	8,5	4,5	3,56	144,	109,0	2,58	1,39

Débit clinker	Puissance FN310	Vitesse FN310
431KL100A01X12	541FN310U01J01	541FN310U01S01
100	100	100
73,0	62,5	98,
72,9	52,2	92,

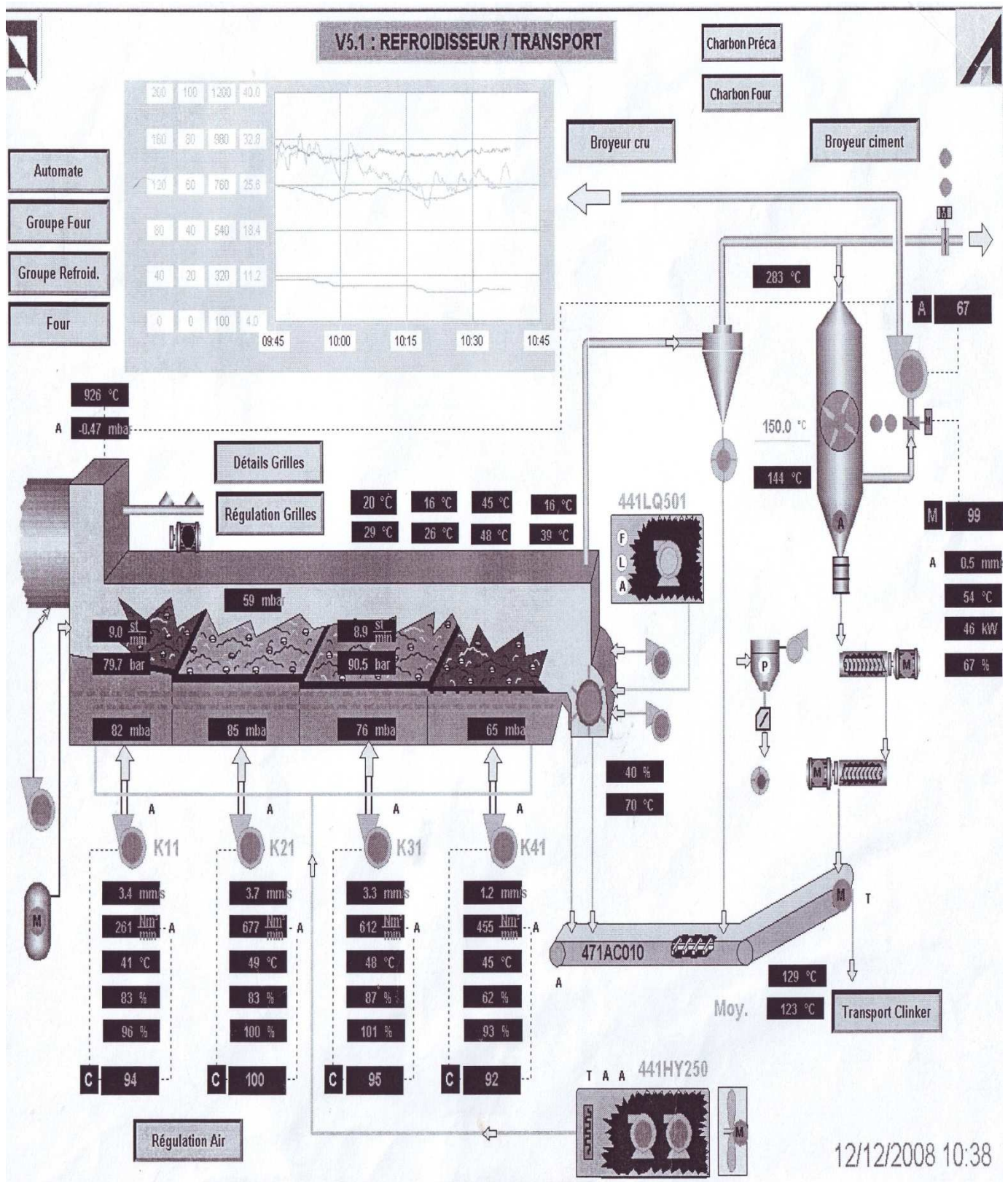
Annexe 4 : Boucle de Régulation des vitesses des grilles



Annexe 5 : Boucle de régulation des ventilateurs de refroidissement



Annexe 6 : Synoptique du refroidisseur



Annexe 7 : Page de saisie des paramètres du refroidisseur du moteur de calcul

Microsoft Excel - série2_avril - Copie

Fichier Edition Affichage Insertion Format Outils Données Fenêtre ?

Accéder à Office Live Ouvrir Enregistrer Sécurité...

L17

SAISIE DES PARAMETRES DU REFROIDISSEUR

Saisi par: Mouhamed NDIAYE

23 juillet 2009 à 15h21mn06s

PAGE PRINCIPALE

CALCUL

4	Vitesse d'aspiration ventilateur FN300	v_1	20	m/s
5	Vitesse d'aspiration ventilateur FN310	v_2	26	m/s
6	Vitesse d'aspiration ventilateur FN320	v_3	26	m/s
7	Vitesse d'aspiration ventilateur FN330	v_4	20	m/s
8	Puissance ventilateur FN030	N_1	46	kW
9	Vitesse ventilateur FN030	n_1	70	%
10	Puissance ventilateur FN310	N_2	66	%
11	Vitesse ventilateur FN310	n_2	99	%
12	Température de la virole	T_v	73	°C
13	Température air ambiant	T_a	30	°C
14	Température sortie refroidisseur	T_o	156	°C
15	Température excès d'air	T_E	347	°C
16	Débit de clinker	Q_{clink}	74200	kg/h
17	Densité	ρ_0	1.2	kg/Nm ³
18	Surface	S	123	m ²
19	Pression au niveau du refroidisseur	P	60	mbar
20	Vitesse grille 1	V_{G1}	9.3	st/min
21	Vitesse grille 2	V_{G2}	8.1	st/min
22	Température capot de chauffe	T_{cap}	972	°C
23	Pression Capot de chauffe	P_{cap}	-0.5	mbar
24	Module de clinker	MS	2.55	
25	Module de clinker	MA	1.47	
26	Module de clinker	LSF	94.62	
27	Granulométrie	G	G1	
28	Ratio grille	RG	1	
29	Ratio air	RA	1	
30	Puissance du ventilateur 1	$PN1$	231	kW
31	Puissance du ventilateur 2	$PN2$	231	kW
32	Puissance du ventilateur 3	$PN3$	231	kW
33	Puissance du ventilateur 4	$PN4$	231	kW

Annexe 8 : Paramètres du refroidisseur et flux d'énergie

Microsoft Excel - série2_avril - Copie

Fichier Edition Affichage Insertion Format Outils Données Fenêtre ?

Accéder à Office Live Ouvrir Enregistrer

H24 fx

A B C D E F G H I J K L M N O P Q

PARAMETRES DU REFROIDISSEUR ET FLUX D'ENERGIE

PAGE PRINCIPALE

std = 295°C $T_F = 347$ °C

std = 1,05 $M_F = 1,32$ kgair/kgclinker

$P_{cap} = -0,5$ $P_e = 112$ kcal/kg.clinker

$T_{cap} = 972$ °C 78,39 %

std = 75 kcal/kgclinker

MS = 2,55

MA = 1,47

LSF = 94,6

Granulo: G1

Ration grille = 1

Vitesse grille 1 = 9,3 st/min

Vitesse grille 2 = 8,1 st/min

Pression Refroidis = 60 mbar

RA = 0,391 kcal/kg.clinker

CON = 0,304 kcal/kg.clinker

Rendement 62,48 %

$Q_{mcl} = 74200$ kg/h

$T_0 = 156$ °C

$P_c = 30,330$ kcal/kg.clinker

21,11 %

PR = 142,92

$T_a = 30$ °C

$M_a = 1,85$ kgair/kgclinker

$R_{air} = 1$

standard = 2,15 kgair/kgclinker

35°C

Pertes.refroidisseur = 143,6 kcal/kg.clinker

QN1 QN2 QN3 QN4

266 Nm³/h 560 Nm³/h 560 Nm³/h 431 Nm³/h

PN1 PN2 PN3 PN4

231 kW 231 kW 231 kW 231 kW

DVAT = 1817 Nm³/h

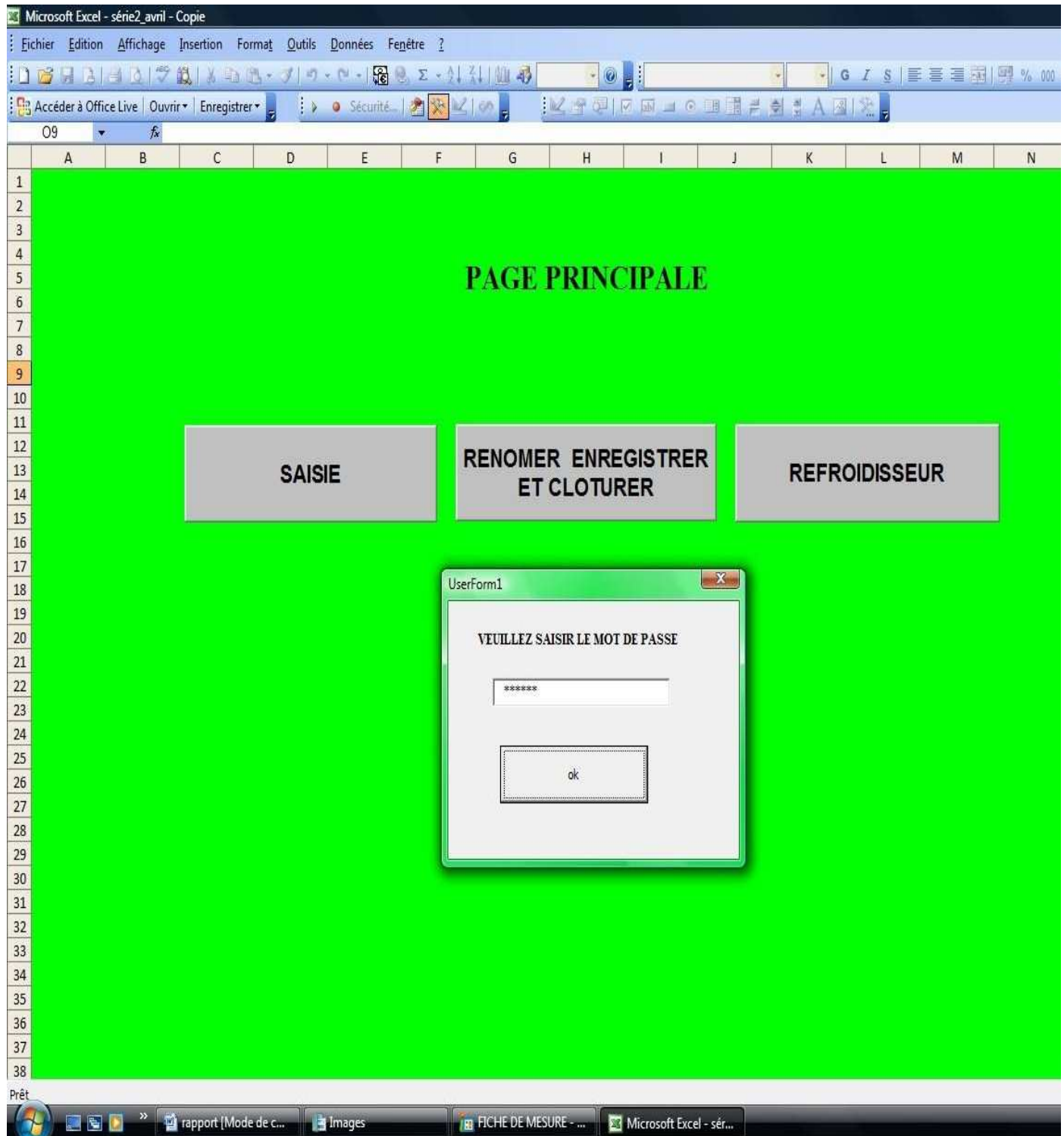
DMAT = 2335 kg/h

DSAT = 3,14 kgair/kgclinker

Pelec = 924 kW

Pelec = 1,245 kW/Kgclinker

Annexe 9 : Page principale du moteur de calcul



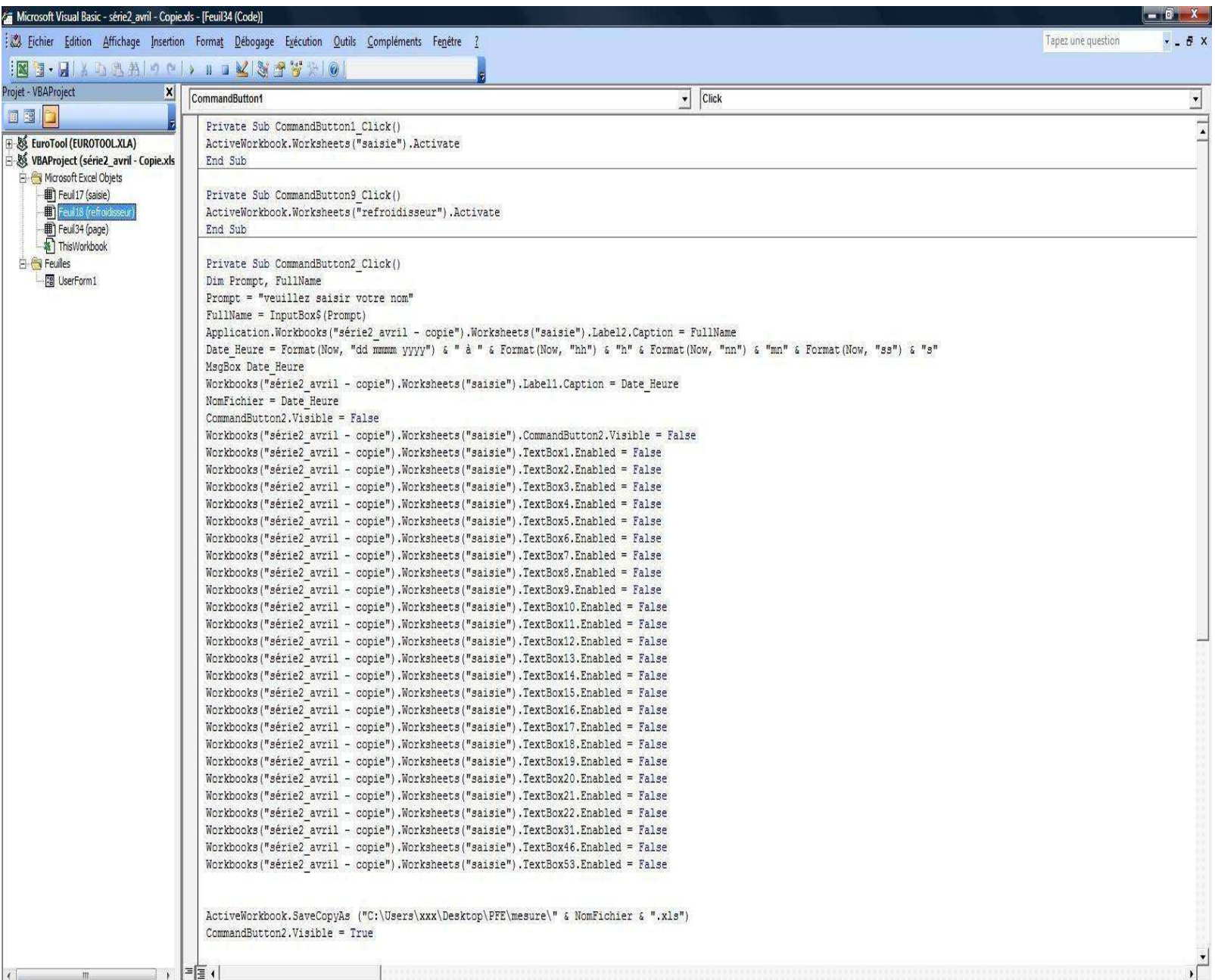
Annexe 10 : Programme de la page saisie du moteur de calcul

```
Microsoft Visual Basic - série2_avril - Copie.xls - [Feuil17 (Code)]
Fichier Edition Affichage Insertion Format Débogage Exécution Outils Compléments Fenêtre ?
Tapez une question
Tapez une question
Li1, Col1
Projet - VBAProject
EuroTool (EUROTOOL.XLA)
VBAProject (série2_avril - Copie.xls)
Microsoft Excel Objets
Feuil17 (saisie)
Feuil18 (refroidisseur)
Feuil34 (page)
ThisWorkbook
Feuilles
UserForm1

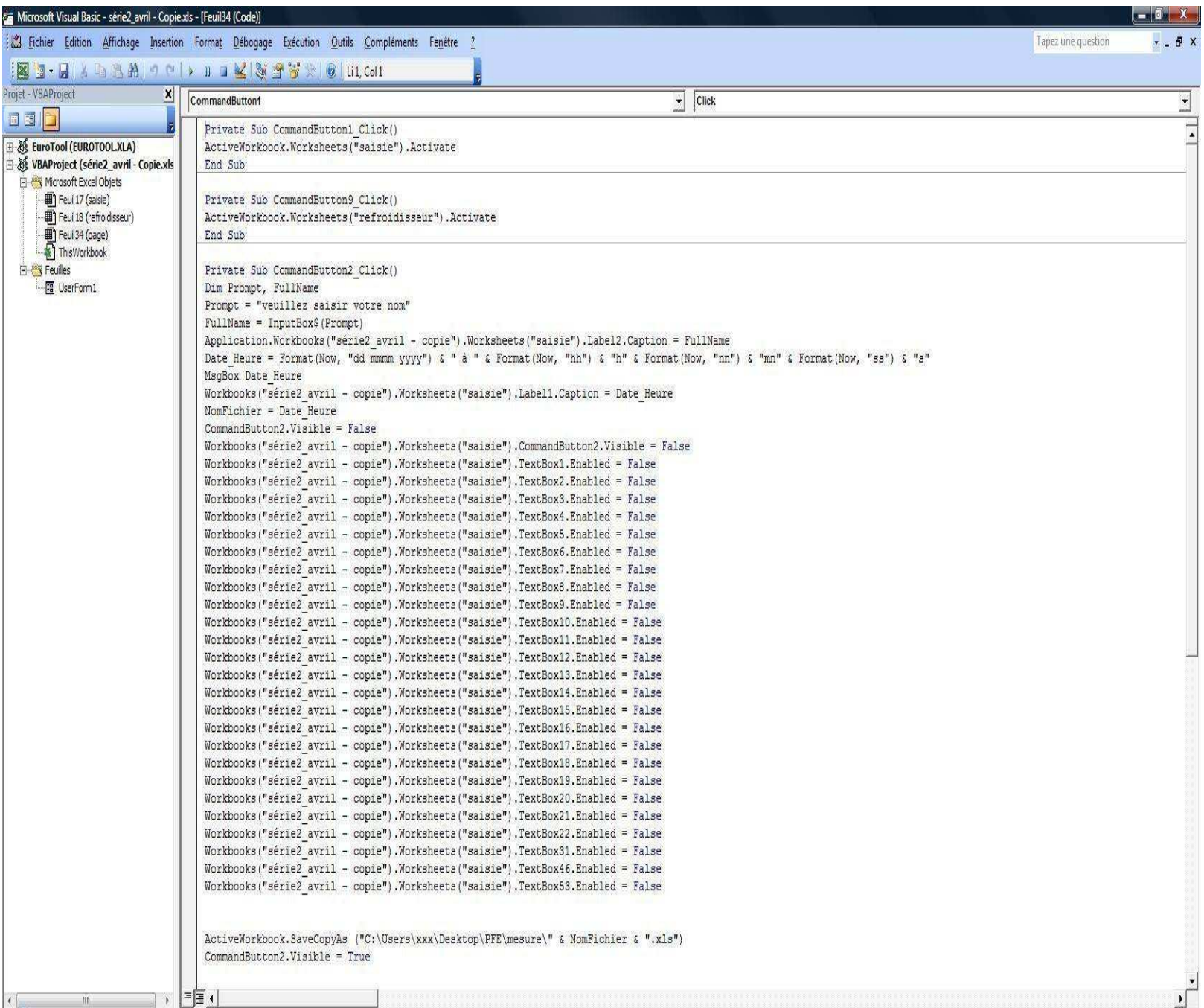
CommandButton1 Click()
Private Sub CommandButton1 Click()
ActiveWorkbook.Worksheets("page").Activate
End Sub

CommandButton2 Click()
Private Sub CommandButton2 Click()
Dim V1, V2, V3, V4, P1, n1, P2, n2, Tv, Ta, T0, Te, Qmclk, Go, MS, Ma, LSF, S, P, Rg, Vg1, Vg2, Tcap, Gf1, Qf1, Pcf1, Nf1, rf1, Nu, Gf2, Qf2, Pcf2, Nf2, rf2, PN1, PN2, PN3,
V1 = TextBox1.Text 'vitesse d'aspiration du ventilateur FN300'
V2 = TextBox2.Text 'vitesse d'aspiration du ventilateur FN310'
V3 = TextBox3.Text 'vitesse d'aspiration du ventilateur FN320'
V4 = TextBox4.Text 'vitesse d'aspiration du ventilateur FN330'
P1 = TextBox5.Text * 1000 'Puissance du ventilateur FN030'
n1 = TextBox6.Text * 985 / 100 'Vitesse du ventilateur FN030'
P2 = TextBox7.Text * 15000 / 100 'Puissance du ventilateur FN310'
n2 = TextBox8.Text * 1450 / 100 'Vitesse du ventilateur FN310'
Tv = TextBox9.Text 'Température de la virole du four'
Ta = TextBox10.Text 'Température ambiante'
T0 = TextBox11.Text 'Température de la sortie clinker'
Te = TextBox12.Text 'Température de l'excès d'air'
Qmclk = TextBox13.Text 'Débit massique de clinker'
G0 = TextBox14.Text 'Densité absolue'
S = TextBox15.Text 'Surface du refroidisseur'
P = TextBox16.Text 'Pression au niveau du refroidisseur'
MS = TextBox31.Text 'module silicique'
Ma = TextBox46.Text 'module alumine'
LSF = TextBox47.Text 'limite de saturation à chaud'
Rg = TextBox48.Text 'Ratio Grille'
Vg1 = TextBox17.Text 'Vitesse de la grille 1'
Vg2 = TextBox18.Text 'Vitesse de la grille 2'
Tcap = TextBox19.Text 'Température du capot de chauffe'
PN1 = TextBox53.Text 'Puissance du ventilateur1 en kW'
PN2 = TextBox54.Text 'Puissance du ventilateur2 en kW'
PN3 = TextBox55.Text 'Puissance du ventilateur3 en kW'
PN4 = TextBox56.Text 'Puissance du ventilateur4 en kW'
Dim CpCTO, Fe, CpETe, CpATar, CSR1, CSR2, Qmt, Mex, Mar, RA, CON, Qm1, Qm2, Perteref, PCT1, PCT2, rend, Cp1450, deltaT, Pc, Pr, DVAT, IMAT, DSAT, Pelec, Pelecs, rho, QN1, Q
CpCTO = 0.186 + (T0 * 54 * (10 ^ (-6))) 'Cp du clinker à la température T0'
CpETe = 0.237 + (Te * 23 * (10 ^ (-6))) 'Cp de l'excès d'air à la température Te'
CpATar = 0.237 + ((Ta - 273) * 23 * (10 ^ (-6))) 'Cp de l'air de refroidissement à la température Ta'
Qm1 = (P1 * 0.94 * 995 ^ 2 * 0.85) / (3450 * (n1 ^ 2)) 'débit massique de l'air pour le ventilateur FN030'
Qm2 = (P2 * 1.205 * 1054 ^ 2 * 0.85) / (1069 * (n2 ^ 2)) 'débit massique de l'air pour le ventilateur FN310'
Qmt = (Qm1 + Qm2) * 3600 'débit massique de l'air totale'
Mex = Qmt / Qmclk 'débit massique de l'excès d'air'
Qv1 = 60 * V1 * (3.14 * 0.55 * 0.55 / 4) 'débit d'aspiration du ventilateur 1'
Qv2 = 60 * V2 * (3.14 * 0.7 * 0.7 / 4) 'débit d'aspiration du ventilateur 2'
Qv3 = 60 * V3 * (3.14 * 0.7 * 0.7 / 4) 'débit d'aspiration du ventilateur 3'
Qv4 = 60 * V4 * (3.14 * 0.7 * 0.7 / 4) 'débit d'aspiration du ventilateur 4'
QN1 = 1.2 * Qv1 / 1.285 'débit d'aspiration du ventilateur 1 en Nm3/h'
QN2 = 1.2 * Qv2 / 1.285 'débit d'aspiration du ventilateur 2 en Nm3/h'
QN3 = 1.2 * Qv3 / 1.285 'débit d'aspiration du ventilateur 3 en Nm3/h'
QN4 = 1.2 * Qv4 / 1.285 'débit d'aspiration du ventilateur 4 en Nm3/h'
```

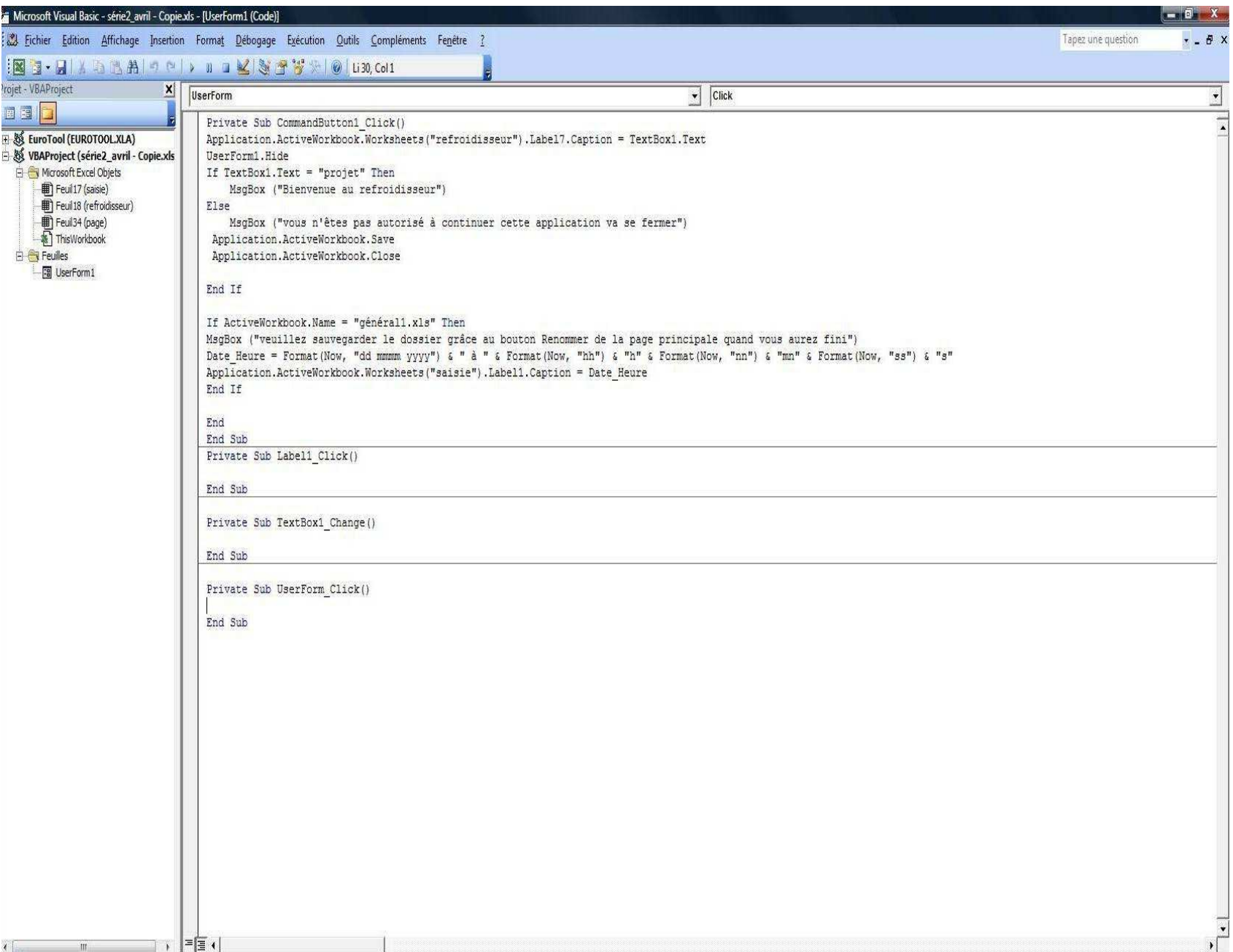
Annexe 11 : Programme de la page du refroidisseur et flux d'énergie



Annexe 12 : Programme de la page principale du moteur de calcul



Annexe 13 : Programme des boîtes de dialogue du moteur de calcul



```
Microsoft Visual Basic - série2_avril - Copie.xls - [UserForm1 (Code)]
Fichier  Edition  Affichage  Insertion  Format  Débogage  Exécution  Outils  Compléments  Fenêtre  ?
Tapez une question
Li 30, Col 1

Projet - VBAProject
EuroTool (EUROTOOL.XLA)
VBAProject (série2_avril - Copie.xls)
  Microsoft Excel Objets
    Feuil17 (saisie)
    Feuil18 (refroidisseur)
    Feuil34 (page)
    ThisWorkbook
  Feuilles
    UserForm1

UserForm
Click

Private Sub CommandButton1_Click()
Application.ActiveWorkbook.Worksheets("refroidisseur").Label7.Caption = TextBox1.Text
UserForm1.Hide
If TextBox1.Text = "projet" Then
    MsgBox ("Bienvenue au refroidisseur")
Else
    MsgBox ("vous n'êtes pas autorisé à continuer cette application va se fermer")
Application.ActiveWorkbook.Save
Application.ActiveWorkbook.Close
End If

If ActiveWorkbook.Name = "général1.xls" Then
MsgBox ("veuillez sauvegarder le dossier grâce au bouton Renommer de la page principale quand vous aurez fini")
Date_Heure = Format(Now, "dd mmmm yyyy") & " à " & Format(Now, "hh") & "h" & Format(Now, "nn") & "mn" & Format(Now, "ss") & "s"
Application.ActiveWorkbook.Worksheets("saisie").Label1.Caption = Date_Heure
End If

End
End Sub

Private Sub Label1_Click()

End Sub

Private Sub TextBox1_Change()

End Sub

Private Sub UserForm_Click()

End Sub
```