

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**UNIVERSITÉ de BLIDA 1**

**Faculté de Technologie  
Département de Génie des Procédés  
Laboratoire de Génie Chimique**



# **Mémoire**

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER EN GENIE DES PROCEDES**

**Spécialité : GENIE DE PROCEDES DES MATERIAUX**

Intitulé du mémoire

**ANALYSE DU CIRCUIT DE BROYAGE CUIT A LA  
CIMENTERIE DE MEFTAH**

Présenté par :

MADANI AMEL

Encadré par :

M<sup>r</sup>. BOUCHERIT AHMED

Année universitaire : 2017/2018

## REMERCIEMENTS

*J'adresse en premier lieu ma reconnaissance à notre **DIEU** tout puissant, de m'avoir permis d'en arriver là, car sans lui rien n'est possible.*

*Le travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au niveau du service process à la cimenterie de Meftah.*

*C'est avec un grand et profond respect que je tiens à remercier mon encadreur :*

***M<sup>r</sup> BOUCHERIT AHMED**, Maître de conférences qui m'a tant soutenu, pour son aide et ses conseils au cours de ce travail et aussi pour les compléments de réflexions qu'il a proposé à la lecture de cet écrit.*

*Mes vifs remerciements vont particulièrement à **M<sup>r</sup> SAADAOUI ALI** pour son amiable accueil et son aide tout au long de ce projet.*

*Nous exprimons nos profonds remerciements à **M<sup>m</sup>ABBES NADIA**, chef de service de Département Process et **M<sup>m</sup>BELALLIA AISSA**, chef de service Production Ciment ainsi que **M<sup>r</sup> BOUHADJAR YOUNES** qui mon aidé pour que ce mémoire puisse voir le jour. Sans oublier **M<sup>m</sup>HASSENAOUI SAMIR**, **M<sup>m</sup>BASOUNE MOHAMED**, **M<sup>r</sup> MALOUKI RACHID**, **M<sup>r</sup> TOUMI FARID** et **M<sup>m</sup>FENNICHE TAREK**, Chef de service ,responsable du labo à la cimenterie de Meftah avec qui j'ai eu un plaisir de travailler avec eux.*

*Je remercie très chaleureusement **M<sup>me</sup> HADJ- ZIANE AMEL** et **M<sup>me</sup> ZERMANE FAIZA** mes enseignantes pour leur confiance, la chance d'être en Master II.*

*Je remercie les membres du jury qui m'ont honoré de leur présence et pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche, et d'avoir accepté d'examiner ce travail et l'enrichir par leurs propositions.*

*Je voudrais exprimer à **M<sup>r</sup> CHIBANI AZZEDINE**, toute ma famille, et plus particulièrement mes parents, ma profonde reconnaissance pour le soutien qu'ils m'ont apporté et pour leur patience et leur amour.*

*Pour finir, j'adresse mes remerciements à tous mes amis, mes collègues de travail, pour leurs encouragements et leur soutien moral. Sans oublier mon Prétendant **M<sup>m</sup>BOUTELDJA ALLEL** qui m'a donné la chance de terminer mes études.*

## **DEDICACES**

*JE dédie ce mémoire à...*

### ***A ma très chère mère***

*Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.*

*Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.*

### ***A mon très cher Père***

*Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous.*

*Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation.*

### ***A mes très chères Salima, Hassina, Nabila et Soumia***

*Mes chères sœurs présentent dans tous mes moments d'examens par son soutien moral et ses belles surprises sucrées.*

*Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité. Je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.*

*Son oublié mon neveu **KHALILE** et ma neisse **ASSINATE** ainsi leur maries **Zoheir, Hichem et Hocine***

### ***A tous les membres de ma famille\*Madani et Lechaa\* petits et grands***

*Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.*

### ***A mes chères amies***

*Fatiha, Fadila, Souhila, Saida, Dalila, Wahiba, Salima, Chehra, Adila, Amina, Hassina, Djamila et Fatima*

### ***A mes chers amis***

*En particulier **AZZEDINE CHIBANI, FOUAD KECHROUD, MOURAD GUESME et YOUNES ADDA** qui m'ont beaucoup aidé et m'ont encouragé.*

### ***A mes collègues de travail***

*A tous les gens qui ont cru en moi et qui me donnent l'envie d'aller en avant. A tous mes amies qui ont accompagné tout au long de ce projet.*

## ملخص:

يتمثل هذا البحث في استحداث ورشة سحق مثالية بمصنع صناعة الاسمنت بمفتاح. إن التحسين والأداء والموثوقية لمطحنة الكرة والفاصل الديناميكي ومرشح الكيس ، يكون لها تدفق معين بجود مقاومة وأيضًا استهلاك طاقة معين لهذه العملية تحت تأثير معلمات التشغيل المختلفة. وللتعامل مع هذا الهدف، يتم تحسين العملية من خلال أرصدة مختلفة يتم تنفيذها. تظهر النتائج الرئيسية التي تم الحصول عليها أن استهلاك الطاقة المحدد لهذا النظام يرتبط بتدفق المواد والهواء وكذلك سرعة الهواء في الطاحونة والدائرة.

## Résumé :

Ce travail présente l'optimisation de l'atelier de broyage cuit à la cimenterie de Meftah.

L'optimisation, la performance et la fiabilité du broyeur à boules, du séparateur dynamique du et filtre à manches, pour avoir un certain débit avec une qualité, une résistance et aussi une consommation spécifique d'énergie de ce procédé sous l'influence des différents paramètres opératoires.

Pour approcher de cet objectif, le procédé est optimisé par des différents bilans qui sont effectués. Les principaux résultats obtenus montrent que la consommation spécifique d'énergie de ce système est liée au débit de matière ainsi qu'à la vitesse de l'air dans le broyeur et dans les circuits ouvert et fermé.

## Abstract :

This work presents the optimization of the grinding cement plant of Meftah. The optimization of the performance and friability of the de ball grinder, dynamic separator and baghouse to have a certain flowrate with a high quality, a strength and specific heat energy consumption of this process under the various operating parameters.

To approach this objective, the process was optimized by various mass balances that are carried out. The main results obtained show mainly that the specific heat energy consumption of this system is related to the material flowrate, and the speed of air in the crusher and in the open and closed circuit.



## TABLE DES MATIERES

Dédicaces	
Résumés	
Sommaire	
Liste des illustrations, graphiques	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale .....	1

### Chapitre 1 : La technologie du ciment

1	Présentation de l'organisme ((S.C.M.I).....	3
1.1	Généralités.....	3
1.1.2	Principaux constructeurs.....	4
1.1.3	Date de mise en service.....	4
1.1.4	Missions et objectifs .....	4
1.1.5	Organisation.....	4
1.1.5.1	Département maintenance.....	5
1.1.5.2	Département Entretien de matériel roulant (E.M.R).....	5
1.1.5.3	Département investissement et valorisation du patrimoine de l'entreprise (I.V.P.E).....	5
1.1.5.4	Sous direction production.....	5
1.1.5.5	Département entretien général et sécurité (D.E.G.S) lié hiérarchiquement à la direction des ressources humaines (D.R.H).....	6
1.1.5.6	Sous direction approvisionnement et gestion des stocks.....	6
1.1.5.7	Département finance et comptabilité (D.F.C).....	6
1.1.5.8	Département ressources humaines.....	6
1.2	Technologie du Ciment.....	7
1.2.1	Principe chimique de fabrication du ciment.....	7
1.2.2	Processus de fabrication du ciment .....	9
1.2.2.1	Préparation des matériaux.....	9
1.2.2.2	Traitement et cuisson de cru.....	10
1.2.2.3	Traitement du clinker.....	11
1.3	Méthodes d'analyse et contrôle de qualité.....	13
1.3.1	Méthodes chimiques .....	13
1.3.1.1	Détermination de la chaux libre CaOL par acidimétrie.....	13
1.3.1.2	Détermination de la perte au feu (PF) .....	13
1.3.1.3	Fluorescence des RX .....	14
1.3.2	Méthodes physiques .....	15
1.3.2.1	Mesure de la surface spécifique par la méthode Blain « NA442 ».....	15

1.3.2.2 Détermination du pourcentage des refus .....	17
1.3. 2.3 La consistance normale .....	17
1.3. 2.4 Essais de prise .....	19
1.3. 2.5 Essai d'expansion .....	20
1.3.2.6 Essais mécaniques (flexion compression) .....	21

## **Chapitre 2: Procède du fonctionnement et paramètres opératoires de broyage du ciment**

2.1 Broyage du ciment .....	24
2. 1.1 Broyeur à boulet ciment.....	25
2. 1.2 Séparateur dynamique.....	26
2. 1.3 Filtres à manche (F.L.S).....	26
2.2 Paramètres opératoire de fonctionnement de l'atelier de broyage cuit .....	27

## **Chapitre 3 : OPTIMISATION DE L'ATELIER CUIT**

3.1 Le broyeur à boulets .....	29
3.1.2 Le bilan du broyeur (TEST AXIAL) .....	30
3.2.1 Le séparateurs .....	31
3.2.2 Le bilan du séparateur (COURBE DE PARTAGE) .....	32
3.3.3 Le bilan matière.....	34
3.3.1 Objectifs du bilan matière.....	34
3.3.2 Principe de calcul.....	34
3.3. 3 Méthode de calculs des "Nœuds".....	35
3.3.3.1 La courbe de partage.....	35
3.3.3. 2 Les Blaines, Températures.....	35
3.3.3.3. Détermination du pourcentage des refus .....	36
3.3.3.4. Autres méthodes.....	36
3.3.4 Le bilan aéraulique.....	36
3.3.4.1 Objectifs du bilan aéraulique.....	36
3.3.4.2 Choix des points de mesures.....	36
3.3.4.3 Mesures aérauliques.....	37
3.4.3.1 Mesures à l'anémomètre.....	37
3.4.3. 2 Mesures au tube de Pitot, Strauscheib, Pitot type R.....	38

## **Chapitre 4 : Etude Expérimentale**

4.1-bilan de broyabilité (Test Axial).....	41
4.2-Bilan de séparation (la courbe Tromp ou de partage).....	42
4.3- Bilan Massique .....	44
4.4- Bilan Aéraulique .....	45

## **Chapitre 5 : Résultats et discussions**

5 .1 Bilan de broyabilité (Test Axial).....	47
5 .4 Bilan de séparation (la courbe de partage).....	48
5.2 Bilan massique .....	49
5.3 Bilan aéraulique .....	51

Conclusion générale

Référencés bibliographiques

Annexes

**TABLE DES FIGURES**  
**LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAPHIQUES ET TABLEAUX**

<b>Figure 1.1 :</b> Situation géographique de la SCMI .....	7
<b>Figure 1. 2 :</b> La cuisson de cru.....	11
<b>Figure I.3 :</b> Schéma de la fabrication du ciment .....	12
<b>Figure 1.4:</b> Perleuse .....	14
<b>Figure 1.5:</b> Pastilleuse.....	14
<b>Figure 1.6:</b> Analyseur RX.....	15
<b>Figure 1.7:</b> Principe de fonctionnement de perméabilimètre de Blaine .....	16
<b>Figure 1.8:</b> Les tamis de 90 $\mu\text{m}$ et de 45 $\mu\text{m}$ .....	17
<b>Figure 1.9 :</b> L'appareil Alpine.....	17
<b>Figure 1.10:</b> Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance .....	18
<b>Figure 1.11 :</b> Le malaxeur.....	18
<b>Figure 1.12:</b> Appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible .....	19
<b>Figure 1.13:</b> Prismètre automatique multipostes.....	19
<b>Figure 1.14:</b> Aiguille de Le châtelier.....	20
<b>Figure 1.15:</b> Essai de stabilité avec l'appareil de Le châtelier .....	21
<b>Figure 1.16:</b> Moules pour moulage des éprouvettes de mortier .....	22
<b>Figure 1.17:</b> Appareil à choc.....	22
<b>Figure 1.18:</b> Chambre humide .....	22
<b>Figure 1.19:</b> Appareil de flexion.....	23
<b>Figure 1.20:</b> Appareil de compression.....	23

<b>Figure 2.1 :</b> Atelier de broyage cuit .....	24
<b>Figure 2.2 :</b> Les silos de stockages .....	25
<b>Figure 2.2 :</b> Synoptique de procédé du fonctionnement de l'atelier du ciment.....	25
<b>Figure 2.3:</b> Broyeur à boulet ciment .....	26
<b>Figure 2.4:</b> Séparateur dynamique ciment .....	26
<b>Figure 2.5:</b> Filtre à manche FLS .....	27
<b>Figure 3. 1 :</b> Le broyeur à boulets .....	30
<b>Figure 3.2:</b> Prise d'échantillons .....	31
<b>Figure 3.3 :</b> Séparateur dynamique .....	32
<b>Figure 3.4 :</b> La courbe de partage de séparateur .....	33
<b>Figure 3. 5:</b> Circuit de matière .....	34
<b>Figure 3.6 :</b> Choix des points de mesures .....	37
<b>Figure 3.7 :</b> Mesures à l'anémomètre.....	37
<b>Figure 3.8 :</b> Mesures au tube de Pitot, Strauscheib, Pitot type R.....	38
<b>Figure 4.1 :</b> Les points de prélèvement (Teste Axial) .....	41
<b>Figure 4.2 :</b> Les différentes étapes de Teste Axial.....	41
<b>Figure 4.3 :</b> Les points de prélèvements (Courbe de Partage) .....	42
<b>Figure 5.1 :</b> Evolution de la granulométrie dans le broyeur (Test Axial) .....	48
<b>Figure 5.2 :</b> Bilan massique de l'atelier de broyage cuit (BK1).....	49
<b>Figure 5.3 :</b> Bilan aéraulique de l'atelier de broyage cuit (BK1) et dans le cas Idéal.....	51
<b>Figure 5.4 :</b> Ventilation broyeur.....	52

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 2.1</b> : Paramètres opératoires de fonctionnement de l'atelier de broyage cuit .....	<b>27</b>
<b>Tableau 5.1</b> : Principaux paramètres de la courbe de Tromp (partage).....	<b>48</b>
<b>Tableau 5.2</b> : Détermination de Pourcentage des Refus (Bilan massique).....	<b>50</b>

## NOMENCLATURE

- **T** : titre d'acétate d'ammonium. ; **V** : volume d'acétate d'ammonium versé.
- **V** : Volume d'acétate d'ammonium versé. (ml)  
correspondant au changement de la coloration).
- **m<sub>1</sub>** : masse creuset (g)
- **m<sub>2</sub>** : masse de creuset produit (g)
- **m<sub>3</sub>** : masse de creuset +produit après calcination (g)
- **S** : surface spécifique (cm<sup>2</sup>/g).
- **K** : constante de l'appareil.
- **e** : porosité de la couche tassée (**0.5**).
- **ρ** : Masse volumique des grains. (kg/m<sup>3</sup>)
- **μ** : Viscosité de l'air à la température d'essai (poises).
- **Q** : débit (t / h)
- **P<sub>c</sub>** : puissance en charge de l'élévateur (kw)
- **P<sub>v</sub>** : puissance à vide de l'élévateur (kw)
- **ρ** : rendement électrique du moteur élévateur
- **h** : hauteur de l'élévateur (m)
- **V** : vitesse (m / s)
- **h** : moyenne des pressions dynamiques mesurées (mm CE)
- **ρ** : masse volumique des gaz (kg/m<sup>3</sup>)
- **ρ<sub>0</sub>** : masse volumique "standard" (kg/m<sup>3</sup>)
- **P<sub>st</sub>** : pression statique (mm CE)
- **θ** : température (°C)
- **A, R, F** : débits d'alimentation, rejets, fines en (t / h).

## LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

S.C.M.I	La Société des Ciments de la Mitidja Industriel
GICA	Groupe industriel des ciments Algérie
KHI	Kawasaki Heavy Industries
FCB	Fives Cail Babcock
SNC	Société National Canadian (engineering) CANADA
SNATPB	Société National Algérienne Travaux Publique B (Génie civil)
SIEMENS	(Moteurs, Automatismes) RFA
FCB	Fives Cail Babcock (Four) France
B.T.C	Bureau Technique Central
E.M.R	Entretien de matériel roulant
I.V.P.E	Investissement et valorisation du patrimoine de l'entreprise
D.E.G.S	Département entretien général et sécurité (D.E.G.S)
D.R.H	Direction des ressources humaines (D.R.H)
D.F.C	Département finance et comptabilité (D.F.C)
CAO	La chaux libre
C <sub>2</sub> S	Silicate bi-calcique ou (bélite), sa formule chimique est 2CaO, SiO <sub>2</sub> .
C <sub>3</sub> S	Silicate tricalcique dénommé (alite), sa formule chimique est 3CaO, SiO <sub>2</sub> .
C <sub>3</sub> A	Aluminates tricalciques ou (célite), sa formule chimique est 3CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .
C <sub>4</sub> AF	Ferro-aluminates tétra-calcique, de formule chimique 4CaO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .
LSF	Lame statu rance facteurs (facteur saturation de la chaux)
MS	Le module silicique MS qui permet d'influencer la fusion :
MA	Le module aluminique MA qui contrôle la viscosité :
PF	La perte au feu
APS	Atelier Pré Séchage
AAF1 /AAF2	Atelier A Filtre 1/2
SSB	Surface spécifique de Blaine
NA442/2000	Norme Algérienne relative aux liants hydrauliques -spécifications

## INTRODUCTION

L'industrie cimentière met aujourd'hui à la disposition de l'utilisateur un grand nombre de ciments qui présentent des caractéristiques précises et adaptées à des domaines d'emploi déterminés. La gamme étendue de compositions, de résistances, de vitesse de prise et de durcissement répond aux usages très divers qui sont faits de béton sur chantier ou en usine [1].

La cimenterie de Meftah (Est de Alger) fait appel à un procédé et à des équipements complexes. Pour réduire ces coûts et améliorer la productivité, une gestion optimisée de l'énergie concrétisée par son utilisation rationnelle est devenue indispensable [2].

Ce projet a pour but l'optimisation du procédé de broyeur cuit à ciment, en vue de permettre :

L'optimisation des conditions opératoires du fonctionnement du broyeur, l'approche retenue vise à satisfaire les objectifs d'Economie d'Energie et la maîtrise de la qualité du produit.

Le but de notre travail est :

- Optimisation du procédé de broyeur cuit à l'usine de Meftah en utilisant le logiciel Lafarge.
- Augmentation du débit de production du ciment de la norme **42.5 AN** et de la résistance à la traction par flexion et la compression à **2, 7 et 28 jours**.
- Optimisation de la consommation spécifique de l'énergie au niveau du broyeur.
- Performance et fiabilité de l'atelier de broyage du ciment.

Pour arriver à cet objectif on propose les chapitres suivant :

Dans le premier chapitre, on présente tout d'abord l'organisme de cimenterie (S.C.M.I) et son fonctionnement, puis un résumé du principe chimique de fabrication du ciment ainsi que ses principales étapes. Les méthodes d'analyse et de contrôle de qualité du ciment qui se font pour les 3 ateliers de broyage cru, combustible et cuit.

Dans le deuxième chapitre, nous décrivons le circuit de matière et du gaz au niveau de l'atelier de broyage cuit de la cimenterie de Meftah et on donne les paramètres opératoires de son fonctionnement à l'entrée et à la sortie de cet atelier.

Dans le troisième chapitre, nous développons les équations des bilans proposés pour optimiser le processus de broyage du ciment au niveau de l'atelier cuit à l'unité de Meftah. L'optimisation est basée sur les bilans de Teste Axial, courbe de partage, de matière et aéraulique sur le broyeur à boulets, séparateur et filtre à manche, en tenant compte de la connaissance des processus utilisés.

Dans le quatrième chapitre, nous représentons les méthodes de travail, prélèvements et de calculs des bilans de broyabilité, séparateur, massique et aéraulique dans l'atelier de broyage cuit.

Dans le cinquième chapitre, nous proposons l'optimisation du processus de Broyage ciment au circuit fermé de matière et ouvert pour le gaz (air), pour calculer le débit matière, gaz (poussière), la charge circulante et l'évolution de la granulométrie de matière dans le broyeur, séparateur et filtre à manche.

Une conclusion générale est donnée pour commenter les résultats obtenus.

## CHAPITRE 1

### LA TECHNOLOGIE DU CIMENT

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord l'organisme de cimenterie (S.C.M.I) et son fonctionnement, puis un résumé du principe chimique de fabrication du ciment ainsi que ses principales étapes. Les méthodes d'analyse et de contrôle de qualité du ciment qui se font pour les 3 ateliers de broyage cru, combustible et cuit.

#### **1-Présentation de l'organisme (S.C.M.I)**

##### **1.1 Généralité**

La Société des Ciments de la Mitidja (**S.C.M.I**), communément appelée cimenterie de Meftah est une filiale du groupe industriel des ciments Algérie (**GICA**). Elle est idéalement située dans le centre du pays (à **27 km** d'Alger). Le projet s'est inscrit dans le cadre du plan quadriennal **1970-1973**. Il a été individualisé par la décision n° **71-20** DI du **10 mars 1971**. La formule de réalisation retenue est celle du lot par lot. Son coût s'est élevé à **680 000 000 DA** au lieu de **336 600 000 DA** prévu. Les principaux constructeurs ont été : **KHI (Kawasaki Heavy Industries) et FCB (Fives Cail Babcock)**. Mise en service en **1975**.

La cimenterie de Meftah est implantée dans la Commune de Meftah, Daïra de Meftah, Wilaya de Blida, localisée à proximité de la route nationale N° **29** reliant la commune de Meftah à celle de Khemis El - Khechna à l'Est et Larbaa à l'Ouest. Elle est située à **27 Km** d'Alger principal port, **10 Km** de la plus proche gare d'Oued – Samar, à une quinzaine de kilomètres de l'aéroport international d'Alger. Elle comprend une carrière de calcaire et d'argile située dans la même commune avec un capital social de **1.400.000.000 DA**. Sa principale activité est la production de ciment (en moyenne **un million de tonnes par an**) avec un effectif globale de **587 salariés**. [3]

### 1.1.2 Principaux constructeurs

- Kawasaki Heavy Industries LTD (K.H.I)
- Fives Cail Babcock (F.C.B)
- SNC (engineering) CANADA
- SNATPB (Génie Civil) ALGERIE
- SIEMENS (Moteurs, Automatismes) RFA
- SN METAL (Charpente) ALGERIE
- FCB (Four) France

### 1.1.3 Date de mise en service

- 31 Janvier 1975, démarrage du cru
- 06 Mai 1975, allumage du four
- 01 Septembre 1975, production de ciment
- 06 Novembre 1975 : Commercialisation du ciment

### 1.1.4 Missions et objectifs

L'unité cimenterie de Meftah a un caractère productif et commercial, la qualité de son produit ciment Portland et son organisation lui ont permis de gagner la confiance de ces clients et réaliser des performances malgré une situation conjoncturelle néfaste.

La capacité de production est située entre **0,8 et 1,2 millions** de tonnes/an.

Ses missions sont :

- Gérer et maintenir les moyens de production.
- Gérer les ressources humaines.
- Informer et communiquer les informations comptables et les rapports périodiques d'activités à la direction.

### 1.1.5 Organisation

L'usine est organisée en un ensemble de départements et de services techniques et administratifs. Les premiers sont présidés par un directeur technique lié hiérarchiquement au président directeur générale, quant aux structures administratives, elles sont liées directement à la direction de l'usine.

Chaque département a sa propre organisation, son mode de fonctionnement d'après ses objectifs dans l'organisme.

#### **1.1.5.1 Département maintenance**

L'entreprise est basée essentiellement sur la ligne de production, donc le rôle de la maintenance devient important pour réduire le manque à gagner. Il est divisé comme suite :

- Bureau Technique Central (B.T.C)
- Zone
- Service et structure.

#### **1.1.5.2 Département Entretien de matériel roulant (E.M.R)**

Ses activités principales sont :

- Gestion du matériel roulant réparti sur l'ensemble de la cimenterie
- Gestion du personnel du département E.M.R
- Technique du parc roulant
- Gestion des coûts du département E.M.R
- Assure l'entretien du matériel roulant.

#### **1.1.5.3 Département investissement et valorisation du patrimoine de l'entreprise (I.V.P.E)**

Il s'occupe principalement de :

- Suivi des projets et leur réalisation.
- Proposition des nouveaux projets.
- Installer les moyens humains et matériels pour le bon déroulement.
- Importation des pièces de montage (l'équipement).
- Contrôle et inventaire des pièces pour l'élaboration de cahier de change et le contrat de sous-traitance.

#### **1.1.5.4 Sous direction production**

Cette dernière se divise en cinq services qui sont :

- Service Fabrication
- Service Contrôle Qualité
- Service Matière Première
- Service Bureau Méthode de Production
- Service expédition

### **1.1.5.5 Département entretien général et sécurité (D.E.G.S) lié hiérarchiquement à la direction des ressources humaines (D.R.H)**

Ce département se divise en deux services qui sont le service hygiène et sécurité et le service moyen généraux.

### **1.1.5.6 Sous direction approvisionnement et gestion des stocks**

Ce département contient deux services :

- Service Approvisionnement
- Service Gestion des Stocks

### **1.1.5.7 Département finance et comptabilité (D.F.C)**

Il se divise en quatre services :

- Service Budget
- Service Finance
- Services Comptabilité Générale
- Service Commercial

### **1.1.5.8 Département ressources humaines**

Il se divise en deux services :

- Service du personnel
- Service formation



# Localisation



Figure 1.1 : Situation géographique de la SCMI [3].

## 1.2 Technologie du Ciment

### 1.2.1. Principe chimique de fabrication du ciment

Le ciment est un liant hydraulique fabriqué à partir du calcaire, d'une source de silice et d'alumine telle que l'argile. Ce mélange broyé puis cuit et ajouté à du gypse donne le produit final après un autre broyage [4].

Les éléments de base du ciment sont donc :

- La chaux **CAO : C**
- L'alumine **Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : A**
- La ferrite **Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : F**
- La silice **SiO<sub>2</sub> : S**

Ces éléments de base sont contenus dans beaucoup de pierres mais au niveau de la **SCMI**. Les matériaux de bases utilisés sont :

- Le calcaire (l'élément incontournable) : haut titre si la quantité de chaux est supérieure à **52%** et bas titre si cette quantité est comprise entre **48 et 52%**. Il contient aussi du **A**, du **F** et du **S** ;
- L'Argile qui contient du **A**

- Le Sable qui contient du **S**
- Le minerai de Fer qui contient du **F**
- Pour obtenir le ciment, nous avons parlé tantôt de cuisson de la matière. En effet, après avoir mélangé les divers constituants à des doses bien déterminées, ils sont acheminés dans un four où l'ensemble est élevé à une température d'environ **1450 °C**. Quatre composants naissent des réactions chimiques induites lors de la cuisson [5]. Il s'agit :
  - Du silicate bi calcique (**C2S**) représentant **50 à 60%** et responsable du durcissement à long terme du ciment ;
  - Du silicate tricalcique (**C3S**) représentant environ **20%** et responsable du durcissement à court terme ;
  - De l'aluminate tricalcique (**C3A**) représentant **5 à 10%** et est le composant le plus réactif et cause du dégagement de chaleur ;
  - De l'alumino ferrite tétra calcique (**C4AF**) présent à environ **10%** dans le ciment et peut influencer la température de formation du clinker.

Il faut noter la présence en petite quantité de magnésie **MgO** et d'alcalis **Na<sub>2</sub>O** et **K<sub>2</sub>O**. Pour avoir des caractéristiques de clinker et des conditions de cuisson bien définies, le dosage de la farine est très important. Des modules de référence sont prévus à cet effet et leur valeur varie d'une cimenterie à une autre en fonction de leurs méthodes fabrication. Ces modules sont :

- Le module **LSF** qui est fonction du potentiel d'attaque de la chaux :

$$\text{LSF} = (100.C) / (20, 8.S + 1.18A + 0.65.F) \quad (1.1)$$

- Le module silicique **MS** qui permet d'influencer la fusion :

$$\text{M}_S = S/A.F \quad (1.2)$$

- Le module aluminique **MA** qui contrôle la viscosité :

$$\text{M}_A = A/F \quad (1.3)$$

Comme nous l'avons souligné auparavant, la valeur de ces modules dépend de l'usine considérée. Cependant, nous pouvons avoir les plages suivantes :

$$90 < \text{LSF} < 98 \quad (1.4)$$

$$2,4 < \text{M}_S < 3 \quad (1.5)$$

$$1 < \text{M}_A < 2 \quad (1.6)$$

La circulation des volatiles comme les chlorures et les alcalis dans le four sont susceptibles de perturber la cuisson. Pour contrôler ce facteur, on définit la volatilité par un **coefficient  $\varepsilon$**  donné par :

$$\varepsilon = 1 - (\%VClink / \%VC5) \quad (1.7)$$

Avec %V = **pourcentage des volatiles dans le clinker et dans le cyclone n° 5.**

Derrière cet aspect chimique de fabrication du ciment, il y a tout un ensemble d'équipements. Ces derniers forment un ensemble très automatisé et bien contrôlé dont nous allons faire le descriptif.

## **1.2.2 Processus de fabrication du ciment**

Le processus de fabrication du ciment semble être identique, du point de vue du principe, pour la quasi-totalité des cimenteries. Les diverses étapes de traitement de la matière pour aboutir au produit fini sont toujours les mêmes à partir de l'approvisionnement jusqu'à l'ensachage.

### **1.2.2. 1 Préparation des matériaux**

#### **■ L'approvisionnement**

Pour fabriquer le ciment, il faut nécessairement **5** éléments essentiels qui sont : **le calcaire, l'argile, le sable, mènèrai de fer et le gypse**. Les deux premiers proviennent des carrières de l'usine qui sont en marge de l'espace occupé par les unités de fabrication, tandis que le sable, minéral de fer et le gypse sont des matières d'exportation qui sont incontournables pour la cuisson.

#### **■ Le concassage primaire**

La matière provenant des carrières est en général d'une très grosse granulométrie. Les étapes suivantes dans le processus n'admettent pas cependant une certaine taille des grains, c'est pour cette raison qu'un concassage primaire par deux concasseurs à marteaux et un à battoirs est effectué pour une première mouture à **200, 450 et 1500 tonnes/heure**. La grosseur des blocs est ainsi considérablement réduite pour permettre aux machines en aval de pouvoir les traiter et les transformer.

## ■ Le transport et le stockage de matières

A partir du concasseur, un système de transport par bandes conduit les matières premières vers les principaux lieux de stockage.

En effet, le calcaire est acheminé vers le Hall de calcaire où il va être stocké en **3 tas** tandis que l'argile est acheminée vers le Hall des ajouts. Dans ce dernier, il y a **un tas** pour chaque type de matière d'ajout (argile, sable, minerai de fer et gypse).

Un mécanisme de grattage par des gratteurs portique et semi-portique serve à excréter les matières premières vers les tapis transporteurs pour poursuivre son cheminement vers les trémies doseurs.

### 1.2. 2.2 Traitement et cuisson de cru

#### ■ Le broyage de la matière crue

Après avoir déterminé par une consigne la teneur des différents composants, les trémies doseurs envoient le mélange obtenu vers l'atelier de pré séchage où il subira un deuxième concassage par un concasseur à marteaux, un système de séchage assuré par les gaz chauds provenant du four sert à faciliter le concassage et à transporter la matière vers un séparateur statique associé avec le concasseur.

Le broyage est une étape destinée à l'affinement des grains.

Après le passage de mélange par **APS**, les rejets obtenus du séparateur statique passent par une bande de transport pour alimenter le broyeur. La farine, dont le principe d'obtention (le broyage) sera explicité ultérieurement, est acheminée vers le silo homo et rejoint les farines récupérées du séparateur statique et les filtres **AAF1 et AAF2**.

#### ■ La cuisson

Le mélange homogène récupéré dans le silo est prêt pour franchir l'étape de la cuisson au niveau du four rotatif cylindrique. A partir du bas du silo homo, le mélange est acheminé vers le haut de la tour échangeur par deux pompes "Fuller" avec le système formé de **5 cyclones**, la matière évolue à contre-courant par rapport au flux d'air ascendant crée tout le long de la tour. Elle pénètre dans le four où la température peut atteindre **1400 °C** et durant son passage elle subie quatre transformations (**décarbonatation, transition, clinkérisation et refroidissement**). Le produit obtenu à la sortie est le **clinker** qui avec le **gypse**, le **calcaire**, donne le **ciment**.

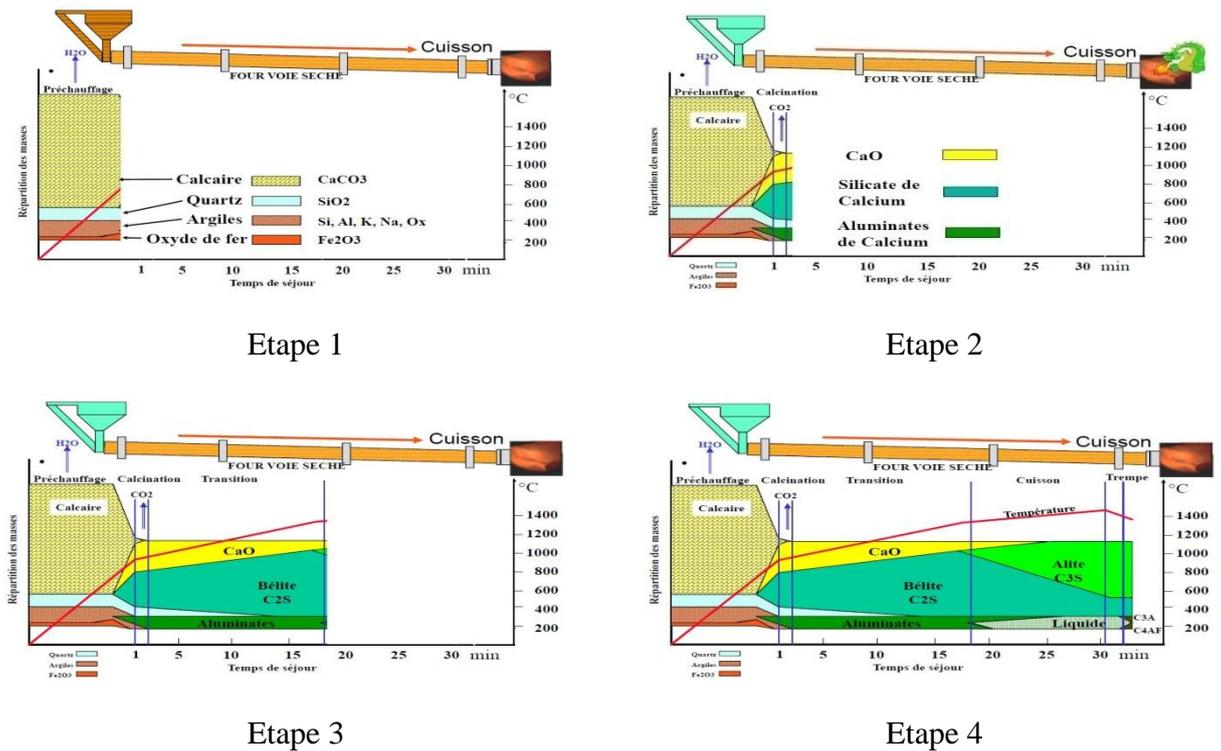


Figure 1. 2 : La cuisson de cru.

### 1.2.2.3 Traitement du clinker

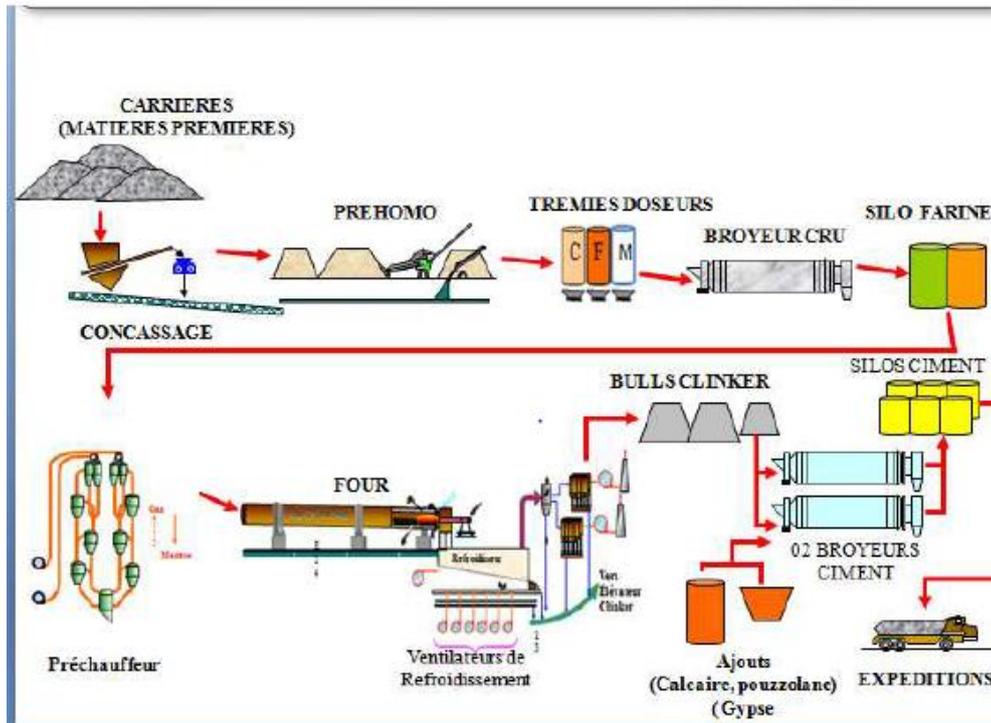
#### ■ Le refroidissement et le concassage

Le clinker obtenu subit à la sortie du four un refroidissement brusque et ramène sa température d'environ **1200 °C à 100 °C**. Cette opération, qui s'accompagne de la transformation de la structure cristalline du matériau, donne naissance à des blocs durs et grossiers de matière qui doivent faire l'objet d'un autre concassage pour enfin être acheminés vers les silos de clinker d'une capacité de stockage de **15.000 tonnes**.

#### ■ Le broyage du ciment

Comme relaté tantôt, le ciment est composé de clinker, de gypse et de calcaire. Que ce soit du hall des ajouts ou du silo clinker, tous passent par un système de transport par bandes ou par chaînes métalliques pour le remplissage des diverses trémies de chargement pour le dosage avant le broyeur du ciment. Ce dernier est muni de boulets de dimensions différentes pour donner de la farine très fine. Les **10 silos** de ciment recueillent ainsi le ciment prêt à l'ensachage puis à la livraison en vrac.

Voici donc globalement le processus de fabrication du ciment (décrit par le diagramme ci après).



**Figure I.3 :** Schéma de la fabrication du ciment [6].

Qui ne s'étonnerait que de cette poudre grise, homogène, constituée de silice, d'alumine et de chaux, presque impalpable, naisse une matière aussi dure que la pierre ? La naissance de cette matière exige un savoir faire, une technologie très performante et une consommation d'énergie importante, pour que l'on puisse transformer cette roche naturelle en une pierre très dure façonnée en des formes diversifiées créées par les bâtisseurs du monde moderne.

L'utilisation des chaleurs récupérées lors du processus de cuisson du cru et le refroidissement brusque du clinker pour sécher et chauffer le cru progressivement jusqu'à la décarbonatation du calcaire qui est la matière de base permettant de réduire de moitié la consommation de l'énergie tout en augmentant la production du clinker.

### 1.3 Méthodes d'analyse et contrôle de qualité

Pour connaître la qualité du ciment, on utilise deux méthodes : chimique et physique.

#### 1.3.1 Méthodes chimiques :

On détermine ces éléments par voie chimique classique ou par fluorescence **RX**.

- Par voie chimique classique [7] :

La méthode classique d'analyse chimique utilisée au niveau de la cimenterie de Meftah est seulement avec la chaux libre.

##### 1.3.1.1 Détermination de la chaux libre CaOL par acidimétrie :

- Peser **1g** de l'échantillon (clinker/ciment) séché à **110 °C** et broyé à une vitesse de **800 t/min** pendant **3 minutes**.
- Introduire la quantité pesée dans un Erlenmeyer de **250 ml**.
- Verser dans cet Erlen **50 ml** d'éthylène glycol.
- Agiter fortement et mettre dans un bain marie pour chauffage à **80 °C**.
- Filtrer ensuite sous vide.
- Titre le filtre avec une solution de HCl **0,1 N** en présence du bleu de bromothymol.
- Le mettre sur une plaque chauffante jusqu'à apparition d'une coloration violette
- Lire le volume **V** correspondant au changement de la coloration.

**Expression des résultants :**

$$\%CaOL = T \times V(HCL) \quad (1.8)$$

**T** : titre d'acétate d'ammonium. ; **V** : volume d'acétate d'ammonium versé.

##### 1.3.1.2 Détermination de la perte au feu (PF) [5] :

Le pourcentage de **H<sub>2</sub>O** et de **CO<sub>2</sub>** dégagé pendant la calcination est déterminé selon le protocole expérimental suivant :

- Peser le creuse à utiliser soit **m<sub>1</sub>**
- Ajouté ( $1 \pm 0.05$  g) de ciment ( $2 \pm 0.001$  g pour farine cyclone)
- Peser le creuset et son contenu soit **m<sub>2</sub>**
- Porter le creuset avec le couvercle et le contenu dans four à (**975 °C ± 25 °C**) pendant **5 min**
- Retirer le couvercle et laisser le creuset encore **15 min** dans le four.
- Après écoulement des **20 min**, sortir le creuset du four.

- Mettre le creuset dans un dessiccateur jusqu'à stabilisation à une T ambiante
- Peser  $m_3$
- Calculer le pourcentage de la PF selon la formule suivant

Tapez une équation ici.  $\%PF = \frac{(m_2 - m_3) \times 100}{(m_2 - m_1)}$  (1.9)

### 1.3.1.3 Fluorescence des RX [5] :

Pour faire les analyses avec les **RX**, on utilise soit des perles soit des pastilles

- Préparation des perles :

On mélange **0,9 g** d'échantillon avec **9 g** de fondant (**66% de  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$  + 34% de  $\text{LiBO}_2$** ) et on le met dans la Perleuse (**Figure 1.4**).



**Figure 1.4 : Perleuse [5].**

Cette méthode ne prend pas beaucoup de temps, puisque il suffit de broyé **10 g** de l'échantillon à une granulométrie inférieure à **63  $\mu\text{m}$**  et on ajoute **1 g** de fondant pour éviter les fissures et on le met dans une pastille. Cette dernière subite une force de **150 kN** à l'aide d'une pastilleuse automatique.



**Figure 1.5: Pastilleuse.**

En dernière étape, on procède à l'analyse par fluorescence X en utilisant le programme correspond à l'échantillon à analyser soit la perle, soit la pastille dans l'analyseur de fluorescence des rayons X (**Figure 1.6**).

Les résultats d'analyse des différents éléments sont exprimés en pourcentage.



**Figure 1.6: Analyseur RX.**

### 1.3.2 Méthodes physiques :

Les essais physiques sont principalement réalisés sur le ciment (mesure de la finesse par tamisage alpine), sur la pâte c'est-à-dire : ciment plus eau (mesure de la consistance normalisée, du temps de prise et de la stabilité) ainsi que sur le mortier (résistances mécaniques : à la compression et à la flexion) [5].

#### 1.3. 2.1 Mesure de la surface spécifique par la méthode Blaine : « NA442 »

Pour la détermination de la finesse du ciment ou bien le degré de broyage

- **Principe :**

La finesse du ciment est mesurée en observant le temps mis à un volume fixé d'air pour traverser un lit de ciment compact à une porosité spécifique à **0,5**.

- **Mode opératoire :**

Placer la grille au fond de la cellule, appliquer sur cette grille au moyen d'une tige à face intérieure plein. Un disque neuf de papier filtre. Verser le liant dans la cellule en utilisant un entonnoir. Donner quelques légères secousses à la cellule pour niveler la couche supérieure du liant. Puis placer sur celle-ci un autre disque neuf de papier filtre. Tasser avec précaution au moyen du piston en évitant la remontée de la poudre au-dessus du papier filtre jusqu'à ce que le collier vienne buter contre le haut de la cellule. Retirer le piston lentement.

Vérifier le niveau du liquide du manomètre qui doit affleurer au trait inférieur.

Enduire de vaseline la partie.

- L'unité de la surface spécifique de Blaine est **cm<sup>2</sup>/g normes NA442/2000** :

- Ciment sans ajouts **2900 à 3000 (cm<sup>2</sup>/g)**
- Ciment avec ajouts **> 3500 (cm<sup>2</sup>/g)** (paramètre technologique)

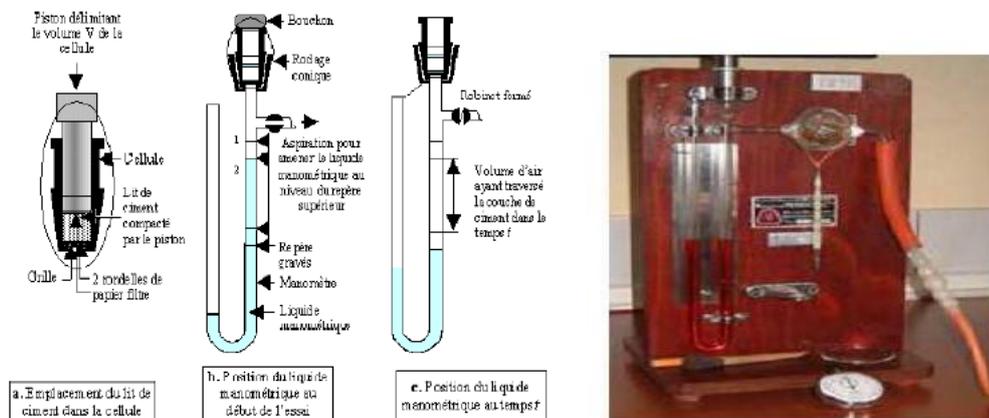
Rodé la cellule et la placer sur son ajustage en lui imprimant un léger mouvement de rotation pour la répartition de la vaseline. Veiller au cours de cette opération à ne pas altérer le tassement de la couche.

Aspirer lentement au moyen de la poire l'air du tube jusqu'à ce que le niveau du liquide atteigne le trait supérieur. Fermer le robinet. Mettre en marche un chronomètre sensible au cinquième de seconde quand le niveau du liquide atteint le deuxième trait. L'arrêter quand le niveau atteint le troisième trait.

Noter le temps écoulé selon la formule :

$$S = \frac{K \sqrt{e} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-e\sqrt{\mu})} \quad (1.10)$$

- **S** : surface spécifique (**cm<sup>2</sup>/g**).
- **K** : constante de l'appareil.
- **e** : porosité de la couche tassée (**0,5**).
- **ρ** : Masse volumique des grains.
- **μ** : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises).



**Figure 1.7: Principe de fonctionnement du perméabilimètre de Blaine [5].**

### **1.3. 2.2 Détermination du Pourcentage des Refus :**

Elle a pour but de déterminer le pourcentage des refus du ciment après le broyage. Les refus sont déterminés pour contrôler l'état de fonctionnement du broyeur et le degré du broyage.

- Peser **100 g** de ciment
- Tamiser à l'aide d'un pinceau un sur un tamis de **45 µm** puis un tamis de **90 µm**.
- Les particules au-dessus du tamis représentant le pourcentage des refus.



**Figure 1.8: Les tamis de 90 µm et de 45 µm.**

- L'appareil Alpine donne automatiquement le pourcentage des refus.



**Figure 1.9 : L'appareil Alpine.**

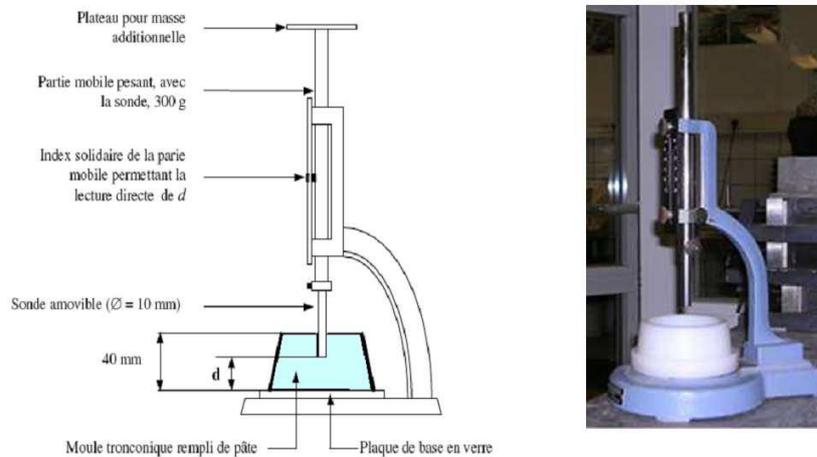
### **1.3. 2.3 La consistance normale :**

La consistance normale caractérise la propriété rhéologique des pâtes. Elle est déterminée par la méthode décrite par la norme **NFP.15.402** et consiste en la détermination de la quantité d'eau qu'il faut ajouter à une quantité de ciment préalablement pesée pour obtenir une pâte ciment dite normale.

#### **▪ Pâte normale :**

La Pâte normale est une pâte de consistance normale ; c'est-à-dire tel qu'en opérant avec

l'appareil de Vicat, la lecture donnant l'épaisseur de la pâte restante entre l'extrémité de la sonde et le fond du moule quant celle – ci a cessé de s'enfoncer sous son propre poids est de **5 mm ± 1**.



**Figure 1.10: Appareil de Vicat muni de la sonde de consistance [5].**

- **Préparation de la pâte :**

Verser dans le récipient du malaxeur la quantité d'eau préalablement déterminée par des successions de manière afin réaliser la consistance normale. Lui ajouter **500 g** de ciment dans le moule tronconique.



**Figure 1.11 : Le malaxeur.**

- **Vérification de la consistance normale :**

L'appareil de Vicat, plateau nu, ayant été muni de la sonde de consistance, placé immédiatement le moule rempli de la pâte dans l'axe de la sonde, laissé descendre cette

dernière perpendiculairement à la surface de la pâte et l'immobiliser à son contact, marquer un temps d'arrêt puis abandonner la sonde à elle-même sans vitesse initiale.

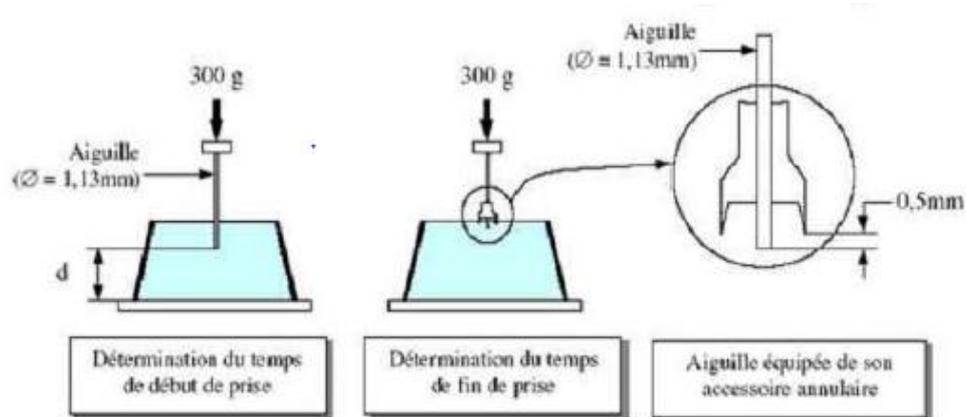
Procéder à la lecture d'épaisseur de la pâte, quand la sonde a cessé de descendre sous son propre poids. Placer l'éprouvette dans l'armoire humide pour déterminer les prises du ciment.

### 1.3. 2.4 Essais de prise :

On utilise l'essai de prise pour déterminer le temps de prise, c'est-à-dire qui s'écoule entre l'instant où le liant a été mis en contact avec l'eau de gâchage et le début de prise et fin de prise.

#### ▪ Principe de l'essai :

On détermine le début de prise ou fin de prise à l'aide de l'aiguille de Vicat s'enfonçant dans un moule tronconique rempli de pâte.



**Figure 1.12: Appareil de Vicat muni de l'aiguille amovible [5].**

Dans le laboratoire d'essais physiques de la cimenterie de Mefah, il dispose d'un équipement appelé « Prisomètre automatique multiposte ».



**Figure 1.13: Prisomètre automatique multipostes.**

- **Début de prise :**

Le début de prise est l'intervalle de temps qui s'écoule entre l'instant du début de gâchage et celui où l'aiguille de Vicat s'arrête à une distance du fond du moule supérieure à **4 mm ± 1**.

- **Fin de prise :**

C'est la période qui sépare le début de gâchage du ciment jusqu'au moment où la sonde portant l'aiguille ne s'enfonce plus dans la pâte.

NB : L'essai de prise est normalement effectué sur une pâte normale, il est exécuté sur un moule Tronconique.

### **1.3. 2.5 Essai d'expansion :**

Elle comporte deux essais effectués sur des éprouvettes de pâte pure, cylindrique de **30 mm** de diamètre et **30 mm** de hauteur, conservées dans leurs moules constitués par une feuille de laiton (**épaisseur 0,5 mm**). Ces moules fondus selon une génératrice, comportant deux aiguilles longues de **15 cm** (Aiguille Le châtelier) soudée de chaque côté de la fente. La variation de l'écartement initiale des ces aiguilles renseignera sur la valeur du gonflement.

L'essai de déformation à chaud décèle la présence de chaux vive libre  $\text{CaO}_L$  surcuit et de magnésie expansives ( $\text{MgO}$ ).

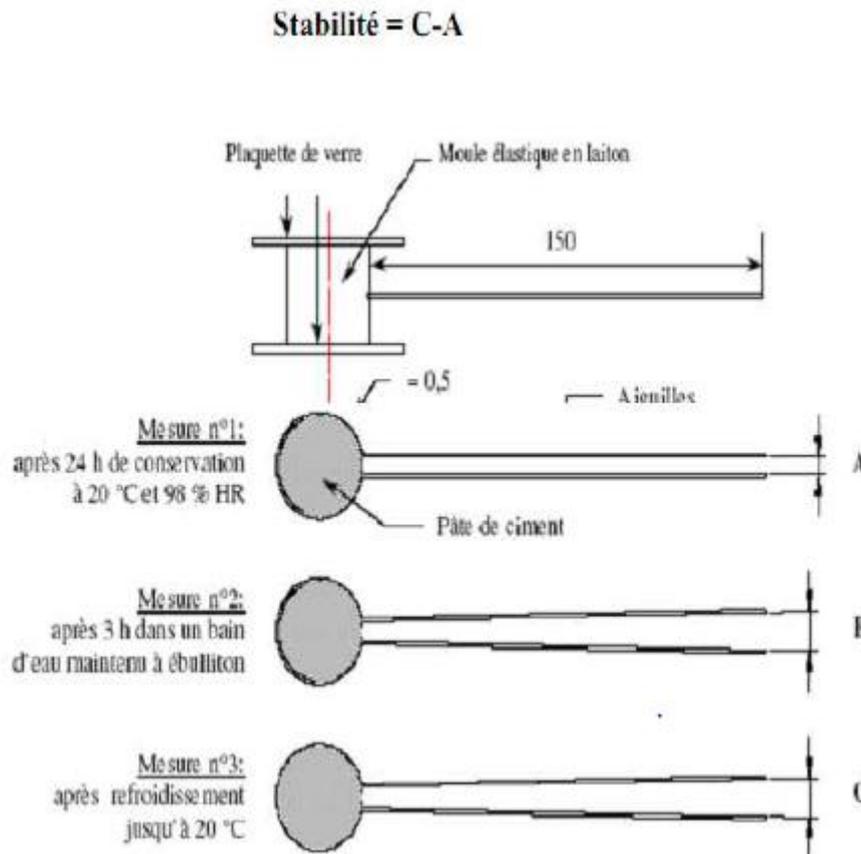


**Figure 1.14: Aiguille de Le châtelier.**

#### **Mode opératoire plaque :**

- Remplir le moule d'expansion par la pâte préparée.
- Mettre sur du verre et arroser la surface à l'aide d'une truelle.
- Couvrir d'une plaque de verre.
- Conserver les aiguilles dans l'armoire humide pendant une journée.

- Après **24** heures, enlever les aiguilles de l'armoire humide, on marque l'écartement entre les deux aiguilles et les mettre dans un bain marie à une température de **100 °C**, pendant 3 heures.
- Ensuite, on mesure après cette durée l'écart (pendant la confection du moule). La variation de l'écartement représente l'expansion à chaud.



**Figure 1.15: Essai de stabilité avec l'appareil de Le châtelier [5].**

### **1.3. 2.6 Essais mécaniques (flexion compression) :**

Ils ont pour but de mesurer les résistances aux différentes contraintes au bout d'un certain temps.

Les essais de flexion et de compression permettent de déterminer la contrainte de rupture à la traction par flexion et la compression des liants hydrauliques.

### ▪ Préparation de mortier normal

- Le malaxeur étant en position de fonctionnement.
- Verser **225 ml** d'eau dans le récipient et ajouter **450 g** de ciment
- Mettre le malaxeur en marche à la vitesse lente pendant une minute dans les **30 derniers seconds** puis introduire **1350 g** de sable normalisé sec.
- Mettre le malaxeur à la vitesse rapide pendant **30 seconds** après arrêter le mouvement pendant **90 seconds**, reprendre le mélange pendant **2 minutes** à la vitesse rapide.
- Ensuite, mélange est versé dans le moule à l'aide d'une spatule, et peut être bien tassé, après un doublet de choc en utilisant l'appareil à choc. Le mortier est mit dans la chambre humide à température de **(20 + 1) °C** et **90%** d'humidité.
- Après **24 heures**, on fait le démoulage et on conserve les éprouvettes dans le bain d'eau.
- L'éprouvette pour **2 jours**, 1 éprouvette pour **7 jours** et 1 éprouvette pour **28 jours**.

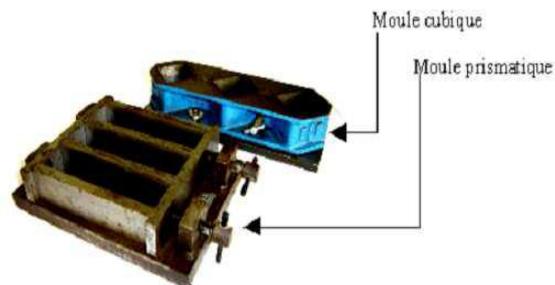


Figure 1.16: Moules pour moulage des éprouvettes de mortier [5].



Figure 1.17: Appareil à choc.



Figure 1.18: Chambre humide [5].



**Figure 1.19: Appareil de flexion.**



**Figure 1.20: Appareil de compression.**

A travers ce chapitre nous pouvons tirer les constatations suivantes :

- Le broyeur à boulet est le type de broyeur le plus répandu dans l'industrie cimentière pour obtenir une bonne réactivité de clinkérisation pour le mélange cru des matières premières et au pour avoir le ciment.
- Les méthodes d'analyse et de contrôle de qualité ont un rôle important pour avoir un ciment **42.5A** de bonne qualité et une résistance initiales à **28 jours** de durcissement qui sont contrôlés par des consignes de qualité au niveau de laboratoire selon le Tableau (**Annexe 1**)

## CHAPITRE 2 PROCEDE DU FONCTIONNEMENT ET PARAMETRES OPERATOIRES DE BROYAGE DU CIMENT

Dans ce chapitre, nous décrivons le circuit de matière et du gaz au niveau de l'atelier de broyage cuit de la cimenterie de Meftah et on donne les paramètres opératoires de son fonctionnement à l'entrée et à la sortie de cet atelier. Le broyage du ciment est composé de deux lignes électriques avec un certain débit (t/h) chacune, de produit du ciment (**Figure2.1**).



**Figure 2.1 : Atelier de broyage cuit [12].**

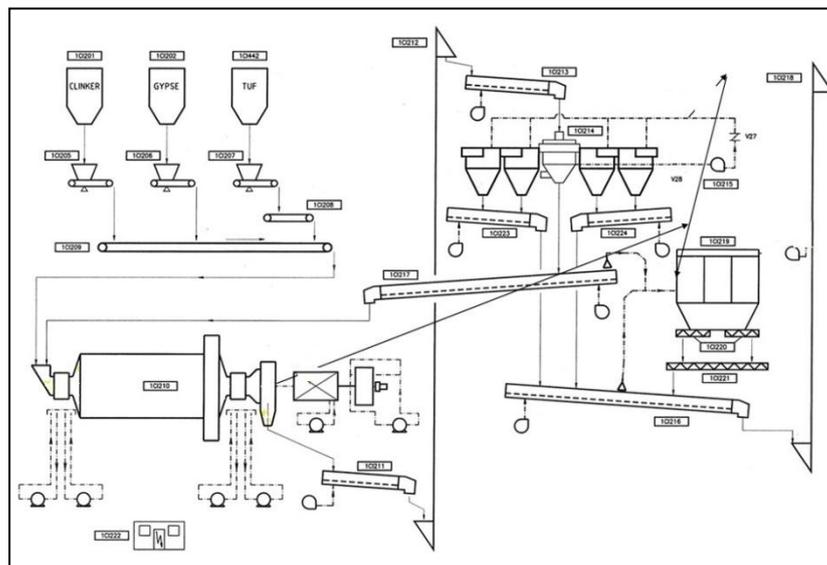
### 2.1 Broyage du ciment :

Cette zone comporte deux lignes dotées chacune d'un broyeur (BK1- BK2), un séparateur et un filtre à manche. Le broyage du ciment est assuré par deux broyeurs à boulets (débit **90 t/h**) en circuit fermé d'un diamètre **Ø 4x15 m** et une puissance de **3400 kW** (**Figure 2.1**), équipé de séparateurs dynamiques, ces derniers sont alimentés par des élévateurs à godets de **500 t/h**. Les gaz poussiéreux sont aspirés par un ventilateur de tirage à travers un filtre à manche pour la récupération du ciment évacué vers les silos de stockage (**Figure 2.2**) et est assuré par une pompe pneumatique et les gaz épurés sont expulsés vers l'atmosphère. Les gaz poussiéreux sont aspirés par un ventilateur de tirage à travers un filtre à manche pour la récupération du ciment et les gaz épurés sont expulsés vers l'atmosphère [12].



**Figure2.2 : Les silos de stockages [12].**

Le procédé du fonctionnement de l'atelier du ciment décrit par le synoptique suivant :



**Figure 2.2 : synoptique de procédé du fonctionnement de l'atelier du ciment.**

Les dispositifs formant la zone de broyage clinker utilisés par la **S.C.M.I** ont les caractéristiques suivantes :

### **2.1.1 Broyeur à boulet ciment**

Le broyeur est caractérisé par :

- Diamètre : 4 m
- Nombre de compartiments : 02
- Longueur utile 1ère chambre : 4 250 mm
- Longueur utile 2ème chambre : 9 750 mm
- Charge de corps broyant 1ère chambre : 67 tonnes 30 %
- Charge de corps broyant 2ème chambre : 155 tonnes 30 %
- Vitesse de rotation : 15,7 tr/mn.
- Puissance installée pour un broyeur : 3 200 kW
- Type réducteur : planétaire
- Attaque centrale : accouplement denté entre broyeur et réducteur + entre moteur et réducteur



**Figure 2.3: Broyeur à boulet ciment [12].**

### **2. 1.2 Séparateur dynamique**

Le Séparateur dynamique est caractérisé par :

- Séparateur à air type ZUB 45 WEDAG
- Diamètre de l'enveloppe : 4 500 mm
- Plage vitesse du plateau 55 - 220 tr/min.
- Débit maximum d'alimentation : 360 t/h
- Débit nominal en produit fini : 90 t/h
- Puissance absorbée du plateau : 110 - 115 kW



**Figure 2.4: Séparateur dynamique du ciment [12].**

### **2.1.3 Filtre à manche (F.L.S)**

Le filtre à manche est caractérisé par :

- Débit : 1370 m<sup>3</sup>/min
- Surface filtrante : 1288 m<sup>2</sup>
- Tissu filtrant : feutre polyester
- Nombre de manches 1120
- température : 100 °C/
- Ventilateur : MT 125S Puissance moteur : 160 kW.



Figure 2.5: Filtre à manche FLS [12].

## 2.2 Paramètres opératoire de fonctionnement de l'atelier de broyage cuit :

L'optimisation du procédé de l'atelier nécessite la connaissance des différents paramètres opératoire de son fonctionnement. A cet effet, nous donnons ci-après, dans le **Tableau 2.1** suivant les paramètres opératoires collectés, relevés et fournis par l'unité durant notre séjour à la cimenterie de Meftah.

Mesures	Unité	Objectifs	Limite Haute	Limite Basse
Puissance BK	Kw	2600	2700	2550
Débit Total BK	t/h	110	120	100
Moteur Broyeur	kW/t	25	27	22
% Clinker BK	%	42,5 A	82,00%	77,00%
% Calcaire BK	%	42,5 A	17,00%	12,00%
% Gypse BK	%	42,5 A	5,00%	3,00%
Puissance Elévateur Sortie BK	kW	44	50	40
Puissance Elévateur Stock BK	kW	20	22	17
P° Entrée Filtre FLS BK	mmCE	-150	-170	-210
P° Sortie Filtre FLS BK	mmCE	-250	-280	-330
DP° Filtre FLS BK	mmCE	-80	-110	-130
Vitesse Séparateur BK	rpm	600	600	400
Débit Rejets BK	t/h	80	120	80
T° Ciment Sortie BK	°C	110	120	0
P° Sortie Broyeur BK	mm CE	-100	-100	-150
T° Gaz Sortie Broyeur BK	°C	90	100	80
Ecoute Ch1 BK	%	60	80	30

Tableau 2.1 : Paramètres opératoires de fonctionnement de l'atelier de broyage du cuit.

D'après le circuit de l'atelier de broyage du cuit nous a permis de calculer et d'obtenir des paramètres opératoires qu'on a besoin pour formé les équations des bilans afin d'optimiser le système de broyage. Ces derniers seront présentés au chapitre suivant.

## CHAPITRE 3

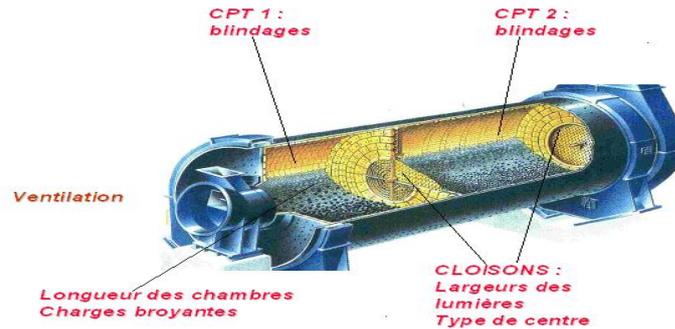
### OPTIMISATION DE L'ATELIER CUIT

Dans ce chapitre, nous développons les équations des bilans proposés pour optimiser le processus de broyage du ciment au niveau de l'atelier cuit à l'unité de Meftah. L'optimisation est basée sur les bilans de Teste Axial, courbe de partage, de matière et aéraulique sur le broyeur à boulets, séparateur et filtre à manche, en tenant compte de la connaissance des processus utilisés.

#### 3.1 Le broyeur à boulets

Cet appareil a pour but de transformer des matières solides déjà réduites grossièrement, en poudres fines et très fines. (**Figure 3. 1**).

Le broyeur tourne avec sa charge de boulets à une vitesse d'environ **77 à 78%** à la vitesse critique, qui est celle à laquelle les boulets commencent à rouler sur toute la circonférence du cylindre. De cette manière, les matériaux (c'est-à-dire le clinker, le gypse et les éventuels matériaux additionnels chargés dans le broyeur) sont concassés et pré broyés entre les boulets et entre le revêtement et les boulets. Dans le compartiment de broyage grossier, la granulométrie des matériaux passe de **25 mm** en moyenne à une taille qui (immédiatement avant leur arrivée sur la cloison de séparation) rend possible leur broyage par les boulets bien plus petits qui se trouvent dans le compartiment de broyage fin. Dans les broyeurs à passage direct, le broyage des matériaux est terminé quand ceux-ci sortent par la grille de sortie. Dans ce cas, on a du ciment fini, qui est envoyé vers les silos de stockage sur des transporteurs. Dans les broyeurs à passage indirect, le matériau passe d'abord de la machine à un séparateur où les particules de produit fini sont séparées des particules grossières constituant ce que l'on appelle le gros, qui est renvoyé vers l'entrée du broyeur. Le produit fini, c'est-à-dire le ciment proprement dit, est dirigé sur les silos de stockage [8].



**Figure 3. 1 : Le broyeur à boulets [8].**

### **3.1.1 Le bilan du broyeur (Test Axial) :**

Pour estimer la performance du système de broyage, il est important de connaître la granulométrie exacte du flux individuels de matériau au sein du circuit de broyage.

L'objectif de l'évaluation de cette distribution est de vérifier en générale, le travail correct des deux compartiments, et en particulier d'apprécier un éventuel manque en engins broyant.

- Les conditions préalables pour un échantillonnage fiable au cours du contrôle de l'efficacité sont les suivants :

- 1- Le broyeur doit être stable (après une marche stable de **4 h**).
- 2- Le broyeur doit être arrêté en crash stop.
- 3- De préférence dans la qualité qui demande la plus grande préparation.
- 4- Relevé des paramètres principaux avant l'arrêt du broyeur

- Débit
- Humidité de gypse
- Humidité de calcaire
- Finesse du produit fini (à la sortie du broyeur)

#### **■ Echantillonnage**

Le prélèvement des échantillons se fait sur toute la longueur du broyeur, avec une distance de **1 m** entre chaque prélèvement, et à une profondeur de **50 cm**. [9].

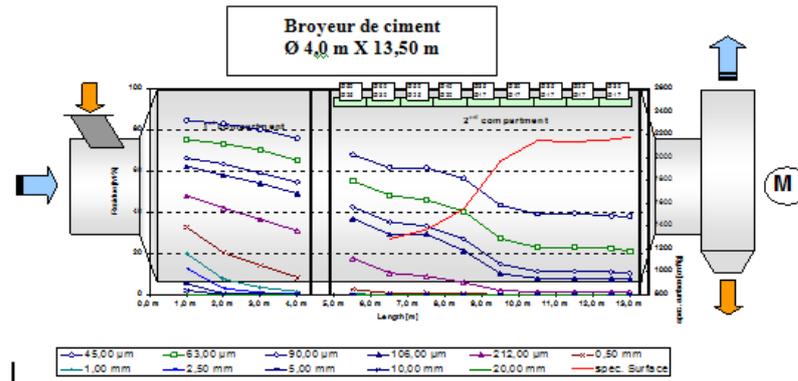


Figure 3.2: Prise d'échantillons [9].

### ■ Utilisation des tamis

On se sert des tamis, **12,5 mm, 4 mm, 2,36 mm, 1 mm, 500 µm, 212 µm, 90 µm et 45 µm**. Après on fait passer chacun des échantillons sur ces différents tamis et on prélève le refus. Les pourcentages trouvés sont portés sur la courbe de distribution granulométrique.

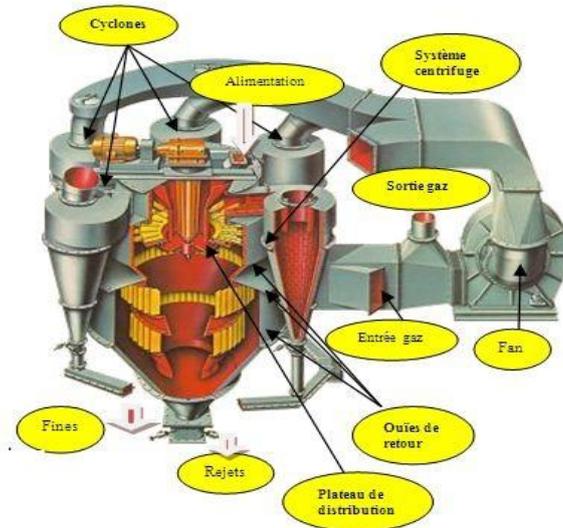
### 3.2 Le Séparateurs :

Un séparateur est un appareil qui utilise le flux d'air pour séparer les fines et les grosses particules [10].

- Il n'a pas de fonction de broyage mais augmente l'efficacité du broyeur en facilitant le travail de ce dernier. Il assure la récupération des fines.
- Le séparateur assure une finesse facile à régler et constante.
- Il prend part aussi au séchage et au refroidissement des matières broyées.

Il y a 3 générations de séparateur selon leurs efficacités de séparation. Au niveau de l'atelier ciment il ya un séparateur de deuxième génération qui a le principe suivant :

- La matière entre dans le séparateur au sommet.
- Séparation forcée par la force centrifuge et les forces de traînée.
- Produit récupéré dans les cyclones externes.
- Réglage de la finesse par la vitesse du plateau de distribution et le flux d'air.



**Figure 3.3 : Séparateur dynamique [10].**

■ **Avantage**

- Bonne récupération des fines
- Finesse réglable par le volet du ventilateur / VSD et la vitesse de rotation des pales de sélection.
- Refroidissement possible dans le séparateur.

■ **Inconvénients**

- Efficacité moyenne sur les valeurs de Blaine élevées.
- Particules grossières dans le produit fini.
- Exigence d'espace.

**3.2.1 Le bilan du séparateur (Courbe de Partage) :**

Le bilan de séparation s'effectue au niveau du séparateur et permet d'en déduire ses coordonnées de fonctionnement tant du point de vue des grandeurs caractéristiques que des divers débits massiques. Il s'établit à partir de prélèvements de matière effectués aux bornes des entrées et sorties du séparateur.

Après analyse de la granulométrie (laser) des flux entrant et sortant du séparateur on trace une courbe de partage (abscisse en coordonnées logarithmiques, ordonnée en coordonnées gaussiennes) [11].

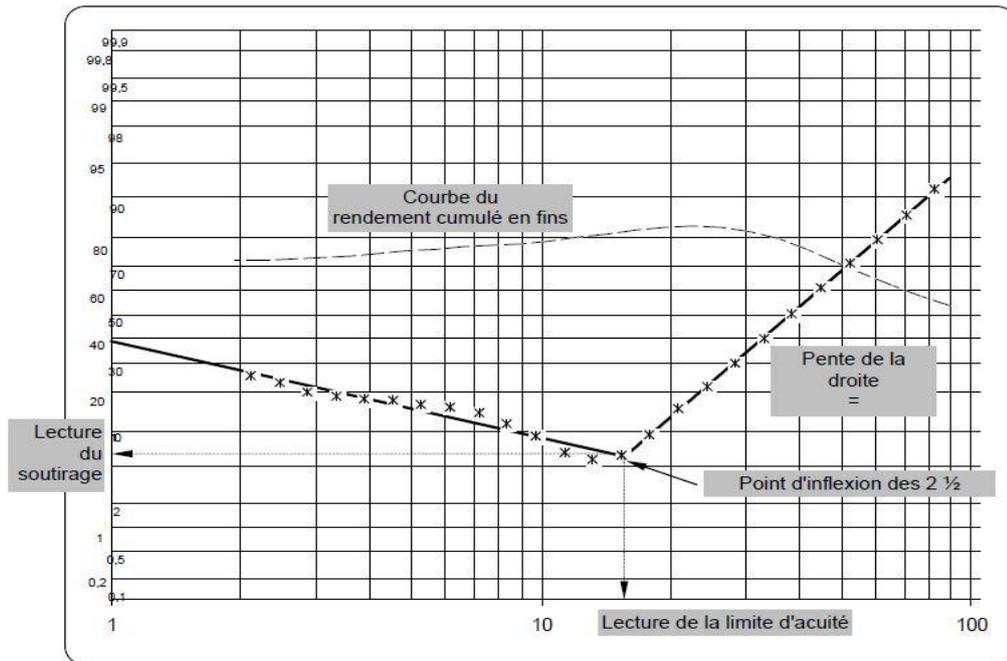


Figure 3.4 : La courbe de partage du séparateur [11].

A partir de cette courbe, on détermine :

- **La limite d'acuité** : Taille minimale d'une particule que le séparateur reconnaît. Elle s'exprime en  $\mu\text{m}$  et est l'abscisse du point d'inflexion des  $2\frac{1}{2}$  droites.
- **soutirage** : Probabilité minimale qu'a une particule d'aller dans les rejets. Il s'exprime en pourcentage, et il est l'ordonnée du point d'inflexion des  $2\frac{1}{2}$  droites.
- **L'imperfection** : Pente de la  $\frac{1}{2}$  droite d'acuité.
- **Le rendement cumulé en fines** : Après obtention de la courbe du pourcentage cumulé des particules de l'alimentation qui vont aux fines, le maximum est appelé rendement cumulé en fines.

Qui permettent de quantifier l'efficacité de la séparation.

On calculera, en connaissant au moins un débit, les débits entrant et sortant du séparateur, (à partir du calcul du **R/A** moyen) ainsi que la charge circulante qui représente le ratio du débit des rejets sur le débit des fines, exprimé en pourcentage.

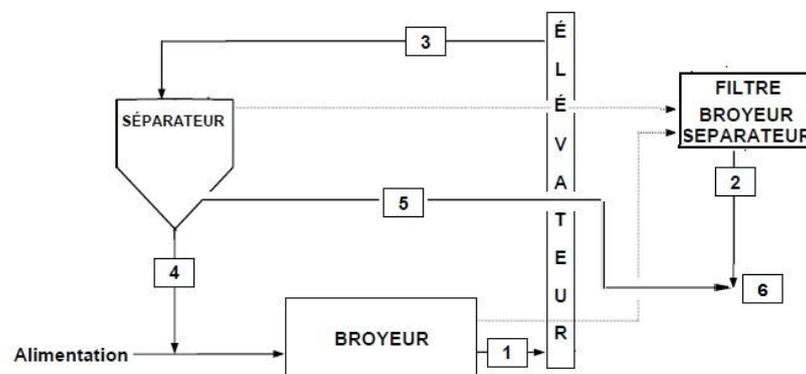
### 3.3 Le bilan matière

#### 3.3.1 Objectifs du bilan matière

Ce bilan permet de connaître le débit de matière dans chaque branche du circuit. Le point le plus important est, sans aucun doute, au niveau du séparateur et de sa charge circulante. Il permet aussi de quantifier le flux de poussières des filtres. Un filtre surchargé en matière aura un mauvais rendement et générera des perturbations aérauliques. Il permet à partir du débit gazeux de définir la surface des médias filtrants [11].

#### 3.3.2 Principe de calcul

En utilisant le schéma d'installation ci-après, on peut décrire le principe de calcul suivant :



**Figure 3. 5 : Circuit de matière [11].**

- On part du débit du produit fini, on détermine, par la courbe de partage du séparateur, les débits d'alimentation et des rejets du séparateur.
- On connaît maintenant le débit d'alimentation du séparateur qui va nous servir de base pour l'élévateur.
- Vérification du débit d'alimentation séparateur par la puissance de l'élévateur.
- Sur cette installation simple, 2 courbes de partages ont suffi pour établir le bilan matière.
- Si on rencontre d'autres "nœuds", on applique la même méthode autant de fois que c'est nécessaire.

### 3.3.3 Méthode de calculs des "Nœuds"

#### 3.3.3.1 la courbe de partage

Le principe est celui d'une courbe de partage, mais on ne retient que le ratio  $\mathbf{R} / \mathbf{A}$  moyen.

Connaissant un débit, on pourra recalculer les 2 autres sachant que :  $\mathbf{A} = \mathbf{R} + \mathbf{F}$ .

#### 3.3.3.2 les Blaines, Températures

La courbe de partage marche très bien sur un séparateur.

En effet sur un séparateur, il y a un tri des particules et les granulométries des divers flux sont très différentes.

La méthode des nœuds, dérivée de la courbe de partage, est plus aléatoire, précisément à cause de granulométries trop proches des divers flux de matière.

Cela peut se traduire par un  $\mathbf{R} / \mathbf{A}$  moyen  $> 1$ , ce qui n'est pas possible car pour respecter :  $\mathbf{A} = \mathbf{R} + \mathbf{F}$ , il faudrait que  $\mathbf{F}$  soit négatif.

Dans ce cas, hormis une pesée camion, on peut essayer de calculer les divers débits par la finesse globale (SSB).

$$\mathbf{Q}(\mathbf{A}) \times \mathbf{SSB}(\mathbf{A}) = \mathbf{Q}(\mathbf{R}) \times \mathbf{SSB}(\mathbf{R}) + \mathbf{Q}(\mathbf{F}) \times \mathbf{SSB}(\mathbf{F}) \quad (3.1)$$

Sur le même principe, on peut faire un mini bilan thermique simplifié des 3 points.

Dans cette optique, il faut faire, lors des prélèvements, au moins un relevé de température par point de prélèvement de matière. En réalité cette méthode des températures est plutôt utilisée pour confirmer la méthode des blaines que pour déterminer les divers débits de matière.

On ne peut pas tenir compte des pertes par paroi, de plus le temps de réaction du thermocouple laisse le temps à la matière de se refroidir légèrement.

Un autre recours est, pour un filtre, d'estimer une concentration de poussières des débits gazeux entrant dans le filtre et de calculer le débit de matière par rapport aux flux gazeux.

### **3.3.3.3 Détermination du pourcentage des refus :**

Le principe est de prélever des échantillons de la matière dans les points **1-2-3-4-5-6 (figure 6)** et déterminer leur pourcentage en refus pour calculer les divers débits.

Les différentes équations utilisées dans ces méthodes sont démontrées dans la partie expérimentale [12].

### **3.3.3.4 Autres méthodes**

Certaines installations sont maintenant équipées de pesées des rejets séparateurs, c'est un moyen de vérifier une partie du bilan de matière.

Une autre vérification est possible par le calcul du débit à l'élévateur par sa puissance (et ses caractéristiques) [11].

$$Q = \frac{(PC - PV) \times \rho \times 3600}{h \times g} \quad (3.2)$$

Avec : **Q** = débit (t / h)

**Pc** = puissance en charge de l'élévateur (kW)

**Pv** = puissance à vide de l'élévateur (kW)

**ρ** = rendement électrique du moteur élévateur

**h** = hauteur de l'élévateur (m)

**g** = 9,81 (accélération de la pesanteur) (m<sup>2</sup>/s)

## **3.4 Le bilan aéraulique**

### **3.4.1 Objectifs du bilan aéraulique**

Ce bilan permet de déterminer la ventilation de chaque appareil, et principalement du broyeur et du séparateur dynamique.

Par ailleurs, on peut situer et quantifier les entrées d'air faux à l'origine soit de perte de débit, soit d'augmentation d'énergie au ventilateur de tirage [13].

### **3.4.2 Choix des points de mesures**

Il faut faire une mesure de débit aéraulique entrée et sortie de chaque appareil (répéter les mesures pour être sûr de la valeur).

Pour les gaines, les filets gazeux doivent être le plus stable possible et ne pas être soumis à des turbulences.

Les turbulences sont générées par un coude, volet, un changement de section ...

Il convient donc de faire la mesure sur **les  $\frac{3}{4}$**  d'une portion longue (**8 à 10 fois** le diamètre de la gaine) et rectiligne.

Malheureusement, ce n'est pas toujours possible, et pour limiter les erreurs de mesure on fait une exploration sur 2.

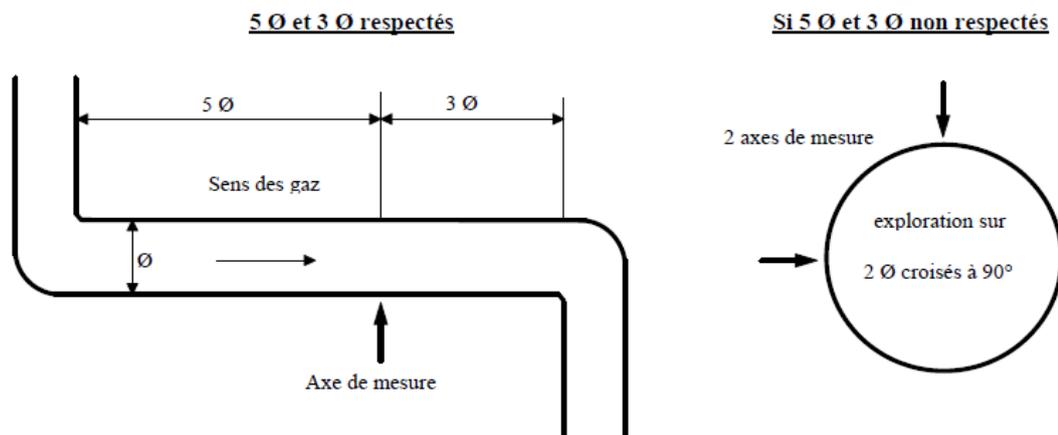


Figure 3.6 : Choix des points de mesures [13].

### 3.4.3 Mesures aérauliques

#### 3.4.3.1 Mesures à l'anémomètre

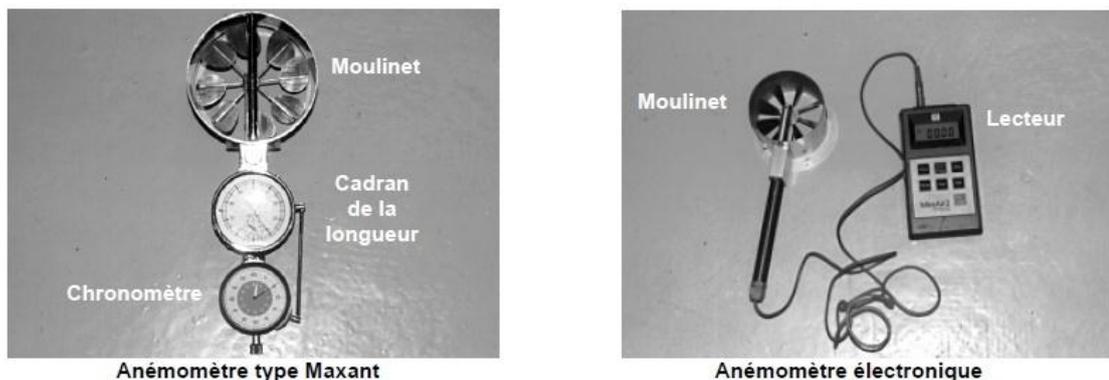


Figure 3.7 : Mesures à l'anémomètre.

Elles se font sur des sections dites "ouvertes" tel que le pavillon du ventilateur, entrée d'air frais au broyeur... On utilise un anémomètre intégrateur, c'est-à-dire qu'il va cumuler une longueur par rapport au temps durant la mesure balayer toute la surface ouverte d'un mouvement le plus régulier possible.

L'anémomètre "**maxant**" est muni de 2 cadrans. Le 1er donne une longueur (**m**), le second le temps (**s**). Il suffit de diviser la longueur par le temps pour obtenir la vitesse (**m/s**). Aujourd'hui les anémomètres **électroniques** donnent directement la mesure de la vitesse. En multipliant la vitesse par la section on obtient un débit en (**m<sup>3</sup>/s**). Pour obtenir un débit ramené à 0 °C (**normal : Nm<sup>3</sup>**) il faut faire une correction de la température.

$$\mathbf{Nm^3} = \frac{(\mathbf{m^3} \times 273)}{(273 + \theta)} \quad (3.3)$$

Avec :  $\theta$  : température en (°C).

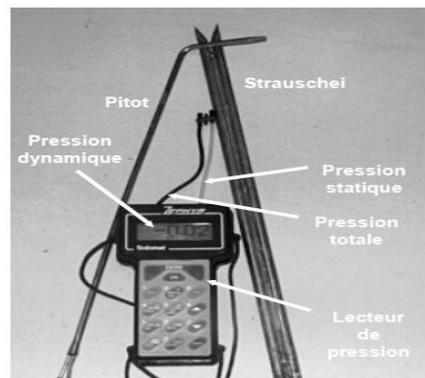
Pour faire une mesure de débit à l'aide d'un anémomètre, il faut :

- mesurer la section
- mesurer la température au point de mesure
- mesurer la vitesse (anémomètre)

### 3.4.3. 2 Mesures au tube de Pitot, Strauscheib, Pitot type R

Elles se font sur des sections dites "fermées" telles que les gaines.

On utilise soit un tube de Pitot, (flux gazeux propres), soit un tube de Pitot type R ou un tube de Strauscheib (flux gazeux chargés de poussières) [13].



**Figure 3.8 : Mesures au tube de Pitot, Strauscheib, Pitot type R [13].**

La formule utilisée est tirée de **la loi de Bernoulli** et s'applique sur des gaz propre

$$\mathbf{V} = \frac{\sqrt{2 \times g \times h}}{\rho} \quad (3.4)$$

Avec :  $V$  = vitesse (**m/s**)

$g = 9,81$  (accélération de la pesanteur) (**m<sup>2</sup>/s**)

$h$  = moyenne des pressions dynamiques mesurées (**mm CE**)

$\rho$  = masse volumique des gaz (**kg/m<sup>3</sup>**)

En multipliant la vitesse par la section, on obtient le débit. ( $Q=S.V$ )

Mais il faut avant, calculer la masse volumique des gaz en tenant compte de leur composition d'une part et d'autre par la corriger de la température et de la pression.

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{273+\theta} \times \frac{10336+Pst}{10336} \quad (3.5)$$

Avec :  $\rho_0$  = masse volumique "standard" (**kg/m<sup>3</sup>**)

$Pst$  = pression statique (**mm CE**)

$\theta$  = température (**°C**)

En règle générale, pour les broyeurs cuits, on utilise la masse volumique des gaz de l'air sec ( $\rho_0 = 1,293 \text{ kg/m}^3$ ) si les ajouts sont en faible quantité et d'humidité faible également. Sinon, il faut la recalculer en fonction de l'analyse des gaz.

On obtient un débit en m<sup>3</sup>/h, qu'il faudra corriger également de la température et de la pression pour obtenir un débit en **Nm<sup>3</sup>/h**. [13]

$$Q(\text{Nm}^3/\text{h}) = Q(\text{m}^3/\text{h}) \times \frac{273}{273+\theta} \times \frac{10336+Pst}{10336} \quad (3.6)$$

Avec :  $\theta$  = température en (**°C**).

$Pst$  = pression statique en (**mm CE**).

Pour faire une mesure de débit avec un tube de Pitot ou de Strauscheib, il faut :

- mesurer la section
- mesurer la température au point de mesure
- mesurer la pression statique au point de mesure
- mesurer les pressions dynamiques sur les axes d'exploration de la gaine.

La pression dynamique se lit directement sur le lecteur par jeu de branchement des pressions totale et statique.

$$\text{Pression dynamique} = \text{pression totale} - \text{pression statique.} \quad (3.7)$$

Strauscheib ou Pitot type R : La pression statique est prise à l'opposée de la pression totale (tube de Pitot à **90 °**), et donc il faut déterminer au laboratoire (ou fourni par le

constructeur) un coefficient de correction ( $k$ ) qui s'applique directement sur la vitesse calculée. Pour un tube de Pitot,  $k = 1$ .

De plus, on utilise le tube de Strauscheib sur des atmosphères poussiéreuses. On applique tout de même la formule tirée de Bernoulli (on ne connaît pas d'autres moyens aujourd'hui) en corrigeant la masse volumique des gaz de la concentration de poussières. Calculer la masse volumique des gaz corrigée de la température et de la pression statique, puis y ajouter la concentration de poussières en ( $\text{kg/m}^3$ ).

$$\rho_{\text{total}}(\text{kg/m}^3) = (\rho_{\text{gaz}} \times \text{correction température} \times \text{correction pression}) + \text{poussières} \quad (3.8)$$

Procéder par itération jusqu'à ce que le débit gazeux en ( $\text{m}^3/\text{h}$ ). Concentration de poussières corresponde au débit de matière véhiculé dans la gaine.

Une mesure réalisée avec un **tube de Strauscheib** est sujette à critique et il faudra s'en souvenir lors du bouclage du bilan aéraulique.

La formule générale devient :

$$V = k \times \sqrt{\frac{2gh}{\rho + \text{pous}}} \quad (3.9)$$

$$Q(\text{m}^3/\text{s}) = V \times \text{Section} \quad (3.10)$$

Avec :  $V$  = vitesse des gaz en ( $\text{m} / \text{s}$ ).

$g = 9,81$  (accélération de la pesanteur) ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$h$  = moyenne des pressions dynamiques en (**mm CE**).

Dans ce chapitre, nous avons développé des équations des bilans de finesses de matières dans le broyeur, déterminer les paramètres de fonctionnement du séparateur, déterminer les débits de matières dans chaque branche du circuit, déterminer la ventilation de chaque appareil, et principalement du broyeur et du séparateur dynamique qui sont démontrés et calculés dans le chapitre suivant (la partie expérimentale).

## CHAPITRE 4

### Etude Expérimentale

Dans ce chapitre, nous représentons les méthodes de travail, prélèvements et de calculs des bilans de broyabilité, séparateur, massique et aéraulique dans l'atelier de broyage cuit.

#### 4.1-Bilan de broyabilité (Teste Axial):

- L'évolution de finesse à l'intérieur du broyeur a été mesurée après un arrêt crash en tamisant des échantillons tout le long de l'axe du broyeur, la **figure** suivante montre les points de prélèvements et les différentes étapes de cette procédure.

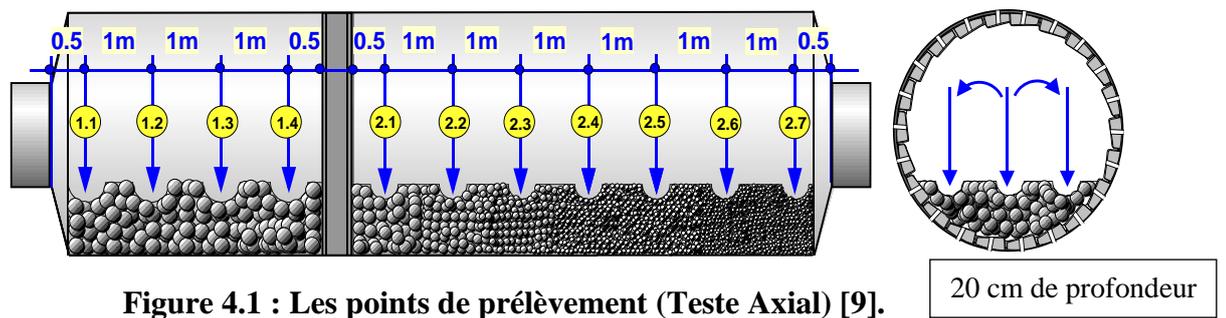


Figure 4.1 : Les points de prélèvement (Teste Axial) [9].



1<sup>er</sup> compartiment: 1-2 kg  
2<sup>ème</sup> compartiment: 0,5 kg

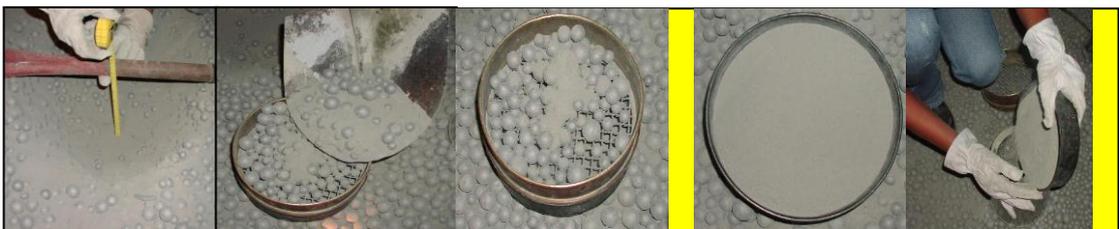


Figure 4.2 : Les différentes étapes de Teste Axial [9].

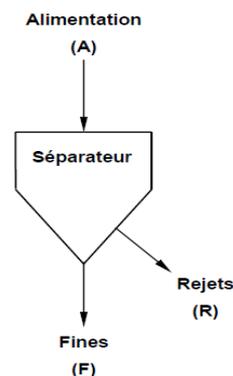
Après le prélèvement, au niveau du laboratoire, nous avons fait passer chacun des échantillons sur ces différents tamis (**12,5 mm, 4 mm, 2,36 mm, 1 mm, 500 µm, 212 µm, 90 µm et 45 µm**) et on a déterminé le refus à chaque point, les pourcentages trouvés sont portés sur la courbe de distribution granulométrique (voir **annexe 3**) partie résultats et discussion).

#### 4.2-Bilan de séparation (la courbe Tromp ou de partage)

Le mode opératoire consiste à une prise des échantillons simultanément dans :

- L'alimentation séparateur (A)
- Le produit fini (F)
- Le rejet de séparateur (R)

Et de faire une analyse granulométrique sur les tamis de **1 µm à 250 µm** pour chacun des échantillons pris, et de mentionner le refus sur chaque tamis.



**Figure 4.3 : Les points de prélèvements (Courbe de Partage) [11].**

On peut écrire : 1)  $A = R + F$  (4.1)

2)  $A \cdot a_x = R \cdot r_x + F \cdot f_x$  par tranche de granulométrie (4.2)

Avec :

- A, R, F débits d'alimentation, rejets, fines en (t/h).
- "x" indice caractérisant une tranche de granulométrie.
- $a_x$ ,  $r_x$ ,  $f_x$  la proportion de la matière d'alimentation (respectivement des rejets et des fines) dans la tranche x.
- $A \cdot a_x$  est le débit (en t/h) de matière dans la tranche x à l'alimentation.

$$\frac{R}{A}(x) = \frac{f_x - a_x}{f_x - r_x} \quad (4.3)$$

De ces 2 équations, on tire :

$R/A(x)$  est le rapport  $R/A$  prédit par la granulométrie de la tranche  $x$ .

Pour l'ensemble de la granulométrie, le  $R/A$  moyen est l'intégration de toutes les tranches de granulométrie et se résume après simplification par la formule :

$$\frac{R}{A}(\text{moyen}) = \frac{\sum(fx-ax) \times (fx-rx)}{\sum(fx-rx)^2} \quad (4.4)$$

Par ailleurs la probabilité ( $P_x$ ) qu'un grain de dimension  $x$  de l'alimentation aille vers les rejets peut s'écrire :

$$P_x = \frac{Rr_x}{Aa_x} \quad (4.5)$$

Cette équation se transforme avec les équations 1) et 2) pour obtenir :

$$P_x = \frac{\left(\frac{R}{A}\right)\text{moyen} \times r_x}{\left(\frac{R}{A}\right)\text{moyen} \times r_x + \left(1 - \left(\frac{R}{A}\right)\text{moyen}\right) \times f_x} \quad (4.6)$$

On calcule la maille moyenne de chaque tranche de granulométrie par la formule :

$$dx = \sqrt{(d1 \times d2)} \quad (4.7)$$

La courbe de partage du séparateur se trace en portant sur le graphique la fonction :

$$P_x = f(dx) \quad (4.8)$$

On obtient 2 ½ droites, la première peu inclinée (zone où le séparateur ne reconnaît pas la taille des particules, sinon de manière globale) et la seconde plus pentue appelée droite d'acuité (zone où le séparateur reconnaît la taille des particules).

Les renseignements donnés par la courbe de Tromp sont les suivants :

- **La charge circulante** exprimée en pourcentage est calculée selon l'équation

$$\text{suivante :} \quad CC = \frac{R}{F} \quad (4.9)$$

Elle peut s'exprimer aussi sous la forme

$$CC = \frac{\left(\frac{R}{A}\right)}{1 - \left(\frac{R}{A}\right)} \quad (4.10)$$

- **Limite d'acuité** : c'est la taille minimale d'une particule que le séparateur reconnaît, Elle s'exprime en  $\mu\text{m}$  et est l'abscisse du point d'inflexion des 2 ½ droites.
- **Calcul des débits** : la courbe de partage nous donne le calcul de  $R/A$  moyen, c'est-à-dire le débit des rejets par rapport au débit de l'alimentation. En connaissant un débit quelconque et avec l'équation :  $A=R+F$ , il est facile de recalculer les

2 autres débits.

- **Le soutirage** : Probabilité minimale qu'a une particule d'aller dans les rejets. Il s'exprime en pourcentage, et il est l'ordonnée du point d'inflexion des 2 ½ droites, il doit être le plus faible possible, mais il est influencé par la charge circulante (outre le type du séparateur). C'est pourquoi on calcule un "soutirage corrigé" qui s'affranchit de la charge circulante par la formule :

$$\text{Soutirage corrigé} = \frac{\text{Soutirage} \times (1 + \text{charge circulante})}{\text{charge circulante}} \quad (4.11)$$

- **Imperfection** : représente la pente de la ½ droite d'acuité définie par la formule :

$$I = \frac{d75 - d25}{2d50} \quad (4.12)$$

**d 25, d 50 et d75** (en  $\mu\text{m}$ ) étant les abscisses des points correspondants de coordonnées **Px à 25, 50 et 75%**.

- **Rendement cumulé en fines** : Par maille, c'est le ratio :

$$\frac{1 - \frac{R}{A}(\text{moyen}) \times F_x}{A_x} \quad (4.13)$$

On obtient ainsi une courbe du pourcentage cumulé des particules de l'alimentation qui vont aux fines, son maximum est appelé rendement cumulé en fines.

### 4.3 Bilan Massique :

La méthode de détermination de pourcentage des refus est donnée dans le Tableau (Annexe 8)

Les prélèvements de matière ont été effectués aux bornes des entrées et sorties du broyeur + séparateur et aux produits finis du filtre et du commun. Voir **Annexe 2**

On se sert des tamis, **212  $\mu$ , 90  $\mu$  et 45  $\mu$**  pour déterminer le pourcentage des refus. soit :

$R_{SF} \rightarrow$ (%) refus produit fini sortie filtre	$Q_A \rightarrow$ débit d'alimentation
$R_{SS} \rightarrow$ (%) refus produit fini sortie séparateur	$Q_{ES} \rightarrow$ débit entré séparateur
$R_{ES} \rightarrow$ (%) refus produit fini entré séparateur	$Q_{SS} \rightarrow$ débit sortie séparateur
$R_C \rightarrow$ (%) refus produit fini commun (filtre+ séparateur)	$Q_R \rightarrow$ débit rejet
$R_R \rightarrow$ (%) refus produit fini rejet	$Q_{SF} \rightarrow$ débit sortie filtre

- **Le débit sorti filtre** est donné par la formule suivante :

$$QSF = QA(RC - RSS)/RSF - RSS \quad (4.14)$$

- **Le débit sorti séparateur** peut s'écrire comme suite :

$$QSS = QA - QSF \quad (4.15)$$

- **Débit rejet**

$$QR = QSS \times (RSS - RES)/RES - RR \quad (4.16)$$

- **Le débit entré séparateur**

$$QES = QSS + QR \quad (4.17)$$

#### 4.4 Bilan Aéraulique :

Durant notre réalisation de ce bilan, nous avons déterminé les débits aérauliques à l'entrée et à la sortie de chaque équipement (Voir **Annexe 2**) en utilisant l'anémomètre dans les sections ouvertes (entrée broyeur et entrée séparateur) et le tube de Pitot dans les sections fermées (sortie broyeur, entrée/sortie ventilateur filtre, sortie séparateur).

Les mesures ont été effectuées en plusieurs fois avec un intervalle de **5 min** pour fiabiliser les résultats en balayant toute la surface d'un mouvement le plus régulier possible.

Sachant que l'**anémomètre** nous donne la **vitesse directe** et le **Pitot** la **pression total /statique**, nous avons calculé les débits suivant les formules ci-après :

- **L'anémomètre** : En multipliant la vitesse par la section, on obtient le débit

$$Q(m3/s) = V_{moy}(m/s) \times S(m2) \quad (4.18)$$

- Si la section est : - rectangulaire  $S=Longueur(L).Largeur(l)$   
- En cercle  $S=Diamètre(D)^2 \cdot \pi/4$

Pour obtenir un débit ramené à **0 °C** (normal : **Nm<sup>3</sup>**), il faut faire une correction de la température selon la relation : vue en **(3.3)**

$$Nm3 = \frac{m3 \times 273}{273 + \theta} \quad (3.3)$$

Avec : **θ** : température en °C.

Pour obtenir un débit estimé par heure on multiplie par **3600**.

$$Q(m3/h) = Q(m3/s) \times 3600 \quad (4.19)$$

➤ **Le tube de Pitot** : On applique la formule tirée de **Bernoulli** vue en (3.4)

$$V = \sqrt{\frac{2 \times g \times h}{\rho}} \quad (3.4)$$

Pour notre étude (broyeurs cuits), on utilise la masse volumique des gaz de l'air sec ( $\rho_0 = 1,293 \text{ kg / m}^3$ ), en corrigeant la température et la pression. Vue en (3.5)

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{273+\theta} \times \frac{10336+P_{st}}{10336} \quad (3.5)$$

Concernant la pression dynamique, elle se lit directement sur le lecteur par jeu de branchements des pressions totale et statique.

$$\text{Pression dynamique} = \text{pression totale} - \text{pression statique} \quad (3.7)$$

En balayant toute la surface de mesure dans les deux sens, nous prenons plusieurs pressions dynamiques, la moyenne est calculée selon la formule suivante :

$$P_{dmoy} = \left[ \sum \sqrt{\frac{P_d}{n}} \right]^2 \quad (4.20)$$

**Avec : n** = nombre de mesures

Puis en multipliant la vitesse par la section on obtient un débit en ( $\text{m}^3/\text{s}$ ). Il faudra corriger également la température et la pression pour obtenir un débit en ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ ).

$$Q(\text{Nm}^3/\text{h}) = Q(\text{m}^3/\text{h}) \times \frac{273}{273+\theta} \times \frac{10336+P_{st}}{10336} \quad (3.6)$$

Dans ce chapitre, nous avons présenté les méthodes de calculs des différents bilans dans l'atelier de broyage ciment et les résultats se trouvent au niveau du chapitre suivant avec des interprétations de chaque partie.

## CHAPITRE 5

### RESULTATS ET DISCUSSIONS

Nous proposons dans ce chapitre l'optimisation du processus de broyage ciment au circuit fermé de matière et ouvert pour le gaz (air), pour calculer le débit de matière, gaz (poussière), la charge circulante et l'évolution de la granulométrie de matière dans le broyeur, séparateur et filtre à manche.

#### 5.1 Bilan de broyabilité (Test Axial T) :

##### 5.1.1 Analyse de la courbe de finesse: Voir le tableau Refus cumulatif (Annexe 3)

###### Compartiment 1 :

- Il doit assurer le concassage des grosses particules de taille supérieure à **2,5 mm**. Son critère de bon fonctionnement est de trouver moins de **5%** de rejets à la maille **2,5 mm (cloison intermédiaire) (Figure 5.1)**.
- La courbe nous montre bien le bon fonctionnement du premier compartiment jusqu'au **point 4**, vu que déjà à l'entrée du broyeur on remarque une décroissance rapide de la granulométrie avec un refus de **38%** sur un tamis de **250 µm** et un refus de **95%** sur tamis de **45µm** et après une évolution de la décroissance le long de ce compartiment. Après le point **4** on remarque que l'évolution est devenue constante avec un refus de **20%** sur un tamis de **250 µm** et **72%** sur un tamis de **45µm** qui est expliqué par un manque de boulet de **60 mm** et **70 mm** de diamètre dans ce compartiment. A la sortie de ce dernier la matière est devenue admissible par les lumières de la cloison de séparation.

###### Compartiment 2 :

- Dans le deuxième compartiment la granulométrie continue sa diminution jusqu'à une distance de **6 m (point 6)** de la cloison, puis on remarque une granulométrie constante sur un parcours de **1 m**, qui peut être expliqué par un manque de la charge broyante dans cette partie. On remarque aussi une brusque et légère augmentation de refus sur les tamis à la sortie du deuxième compartiment qui est expliquée par l'effet du ventilateur de tirage qui aspire les fines particules.

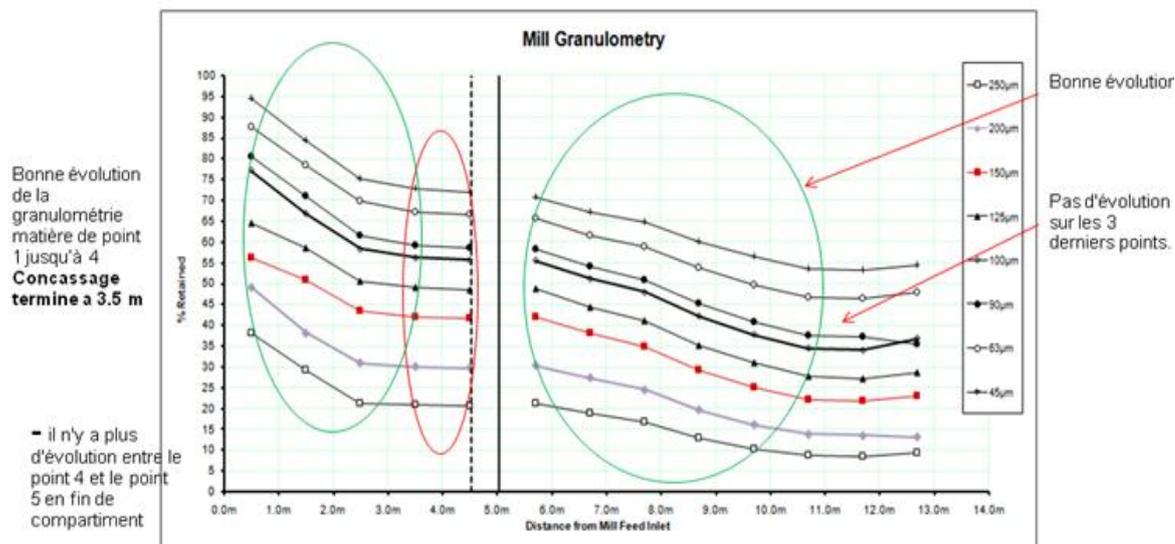


Figure 5.1 : Evolution de la granulométrie dans le broyeur (Test Axial).

## 5.2 Bilan de séparation (Courbe de partage):

La courbe de partage est établie à partir des granulométries des flux entrant et sortant du séparateur, elle est tracée en complétant sur le graphe la fonction  $P_x = f(dx)$ . Les calculs et la courbe sont représentés dans (Annexe 5/6)

Courbe de Partage du séparateur		Standard du séparateur de 2 <sup>ème</sup> génération
Charge circulante	<b>43%</b>	<b>100 à 250%</b>
Soutirage (By-pass)	<b>1,0%</b>	<b>10 à 35 %</b>
Limite d'acuité	<b>34 µm</b>	<b>15 à 25 µm</b>
Imperfection brute	<b>0,45</b>	<b>0,30 à 0,35</b>
Rendement cumulé en fins	<b>96,2%</b>	<b>100%</b>

Tableau 5.1 : Principaux paramètres de la courbe de Tromp (partage)

\*Résumé de l'annexe 7 \*

- La charge circulante nous donne une à image du fonctionnement de l'atelier, dans notre cas elle est trop faible (**43%**) par rapport la norme donc pour la maîtriser, il faut jouer sur la consigne (Rejet et Alimentation (**R+A**))

Une charge circulante basse indique que le broyeur est sous alimenté.

- Le soutirage (**1%**) se situe dans la plage de valeurs rencontrées pour les séparateurs de 2<sup>ème</sup> génération (**10 à 35%**), mais doit pouvoir être amélioré au vu des résultats obtenus par le BK2 (**15%**).

Rappel : 1% de soutirage signifie qu'une quantité minimale des particules fines retournent au broyeur.

- De la même manière, l'imperfection normalisée du séparateur de deuxième génération se situe en général entre **0,30 et 0,35%**. Celui-ci présente une imperfection de **0,45%**, caractéristique d'une capacité de coupure médiocre, et qui peut être améliorée.
- La limite d'acuité, c'est-à-dire la limite en deçà de laquelle le séparateur n'est plus capable de distinguer la taille des particules, est de **34  $\mu\text{m}$** , par rapport à ce qui est correct pour ce type de séparateur (**15 à 25  $\mu\text{m}$** ).
- Rendement cumulé en fins est de **96,2%** et qui est correct dans notre cas.

### 5.3 Bilan massique

Le bilan massique est indiqué sur le schéma ci-dessous et les résultats des calculs sont portés sur le tableau de (l'Annexe 8).

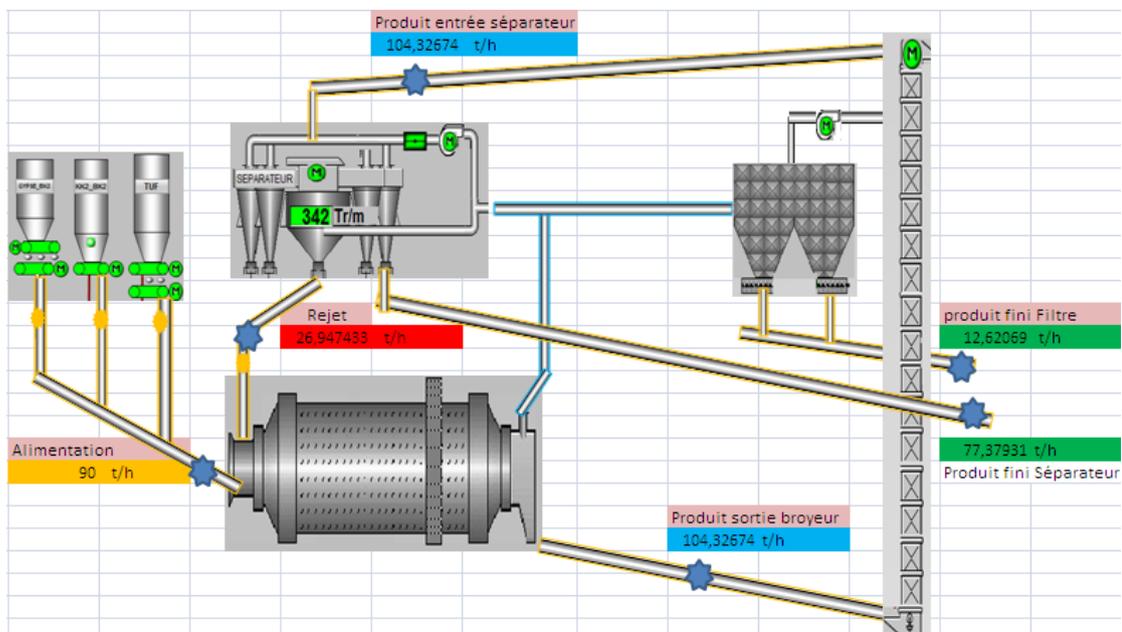


Figure 5.2 : Bilan massique de l'atelier de broyage cuit (BK1).

Refus (%) sur tamis			
	45 $\mu\text{m}$	90 $\mu\text{m}$	212 $\mu\text{m}$
R <sub>SF</sub>	19,9	7,46	0,54
R <sub>SS</sub>	29,47	6,02	0,6
R <sub>ES</sub>	45,5	22,02	3,46
R <sub>C</sub>	28,128	6,02	0,27
R <sub>R</sub>	91,53	66,21	10,91

**Tableau 5.2. Détermination du Pourcentage des Refus (Bilan massique).**

- Ce bilan permet de connaître le débit de matière dans chaque branche du circuit (débits ciment sortie séparateur, rejets, sortie broyeur et sortie filtre à manche).

Le point le plus important est, sans aucun doute, c'est la charge circulante. Plus ce dernier est au dessous de celle recommandée par le constructeur (dans notre cas **43%** par rapport au design qui est de **100 à 250%** pour un séparateur de 2<sup>ème</sup> génération). Pour conclure, plus le temps de passage de la matière sera très long, plus presque la totalité du produit passe comme produit finis (sur broyage).

- Il permet aussi de quantifier le flux de poussières des filtres (soit celles sorties du broyeur ou sorties du séparateur). Un filtre à manche surchargé en matière où on aura un débit de sortie au niveau du filtre important (on aura un mauvais rendement et génération des perturbations aérauliques. Si les poussières à l'entrée du filtre sont trop importantes, il est fort probable que la concentration de poussières sorties du filtre sera en augmentation.
- Pour un filtre à manche le ratio de dimensionnement est de **60 à 140 m<sup>3</sup> / h / m<sup>2</sup>** (vitesse de filtration ou taux de travail) ce qui correspond à des vitesses de **1 à 2,3 m / min**. dans notre cas, la valeur mesurée pour un débit de sortie au niveau du filtre de **61855 m<sup>3</sup>/h** avec une surface filtrante de **1274 m<sup>2</sup>**, soit une vitesse de **0,8 m/s**, cette dernière à été mesurée pour un débit maximal du ventilateur de tirage FLS.
- Donc un débit qui peut satisfaire le dépoussiérage de l'atelier BK1 pour un débit du broyeur au alentour du débit nominal (soit **90 t/h**) pour améliorer la performance du

broyeur au delà de **90 t/h**, nous devons augmenter le débit de tirage du ventilateur FLS au-delà de **77000 m<sup>3</sup>/h**.

- A travers le bilan de matière on pourra résoudre un dysfonctionnement de la marche de l'atelier en faite le refus de **45 µm** séparé du produit fini (sortie séparateur + sortie filtre à manche) donnera une piste rapide pour résoudre le problème en agissant sur le débit de dépoussiérage au niveau de la sortie du broyeur à travers le volet manuel installé sur la conduite du dépoussiérage séparateur.

#### 5.4 Bilan aéraulique

Le bilan aéraulique est indiqué sur le schéma suivant et les résultats des calcules sont portés sur le tableau de (Annexe 9). Ce dernier a été établi pour un débit de 90 t/h en humide.

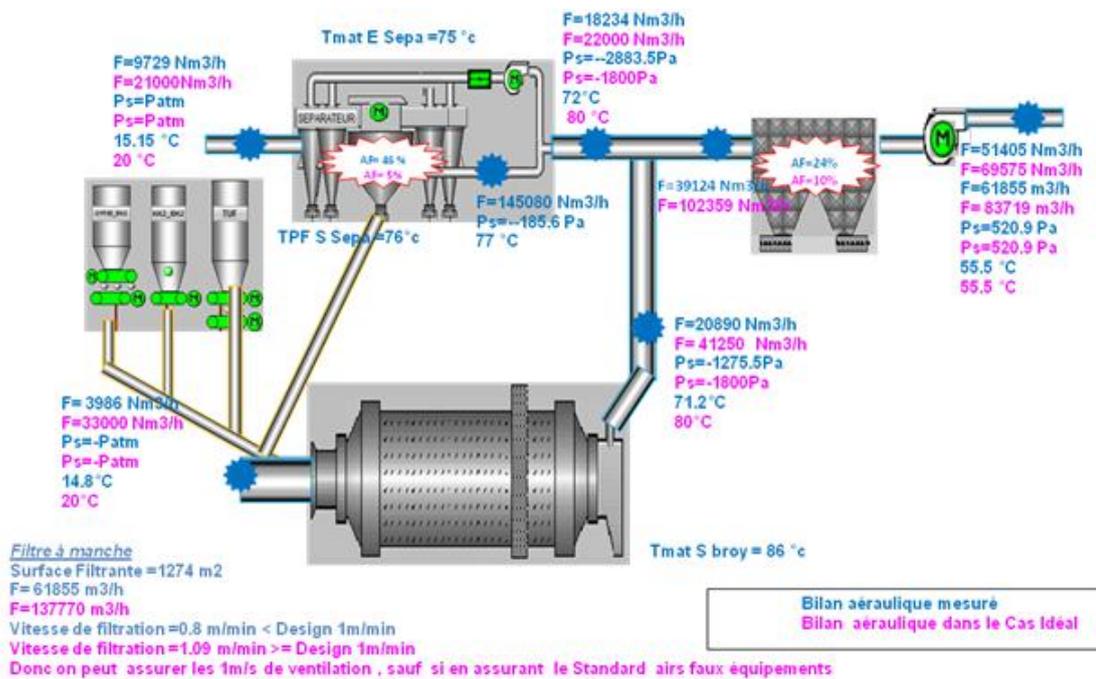
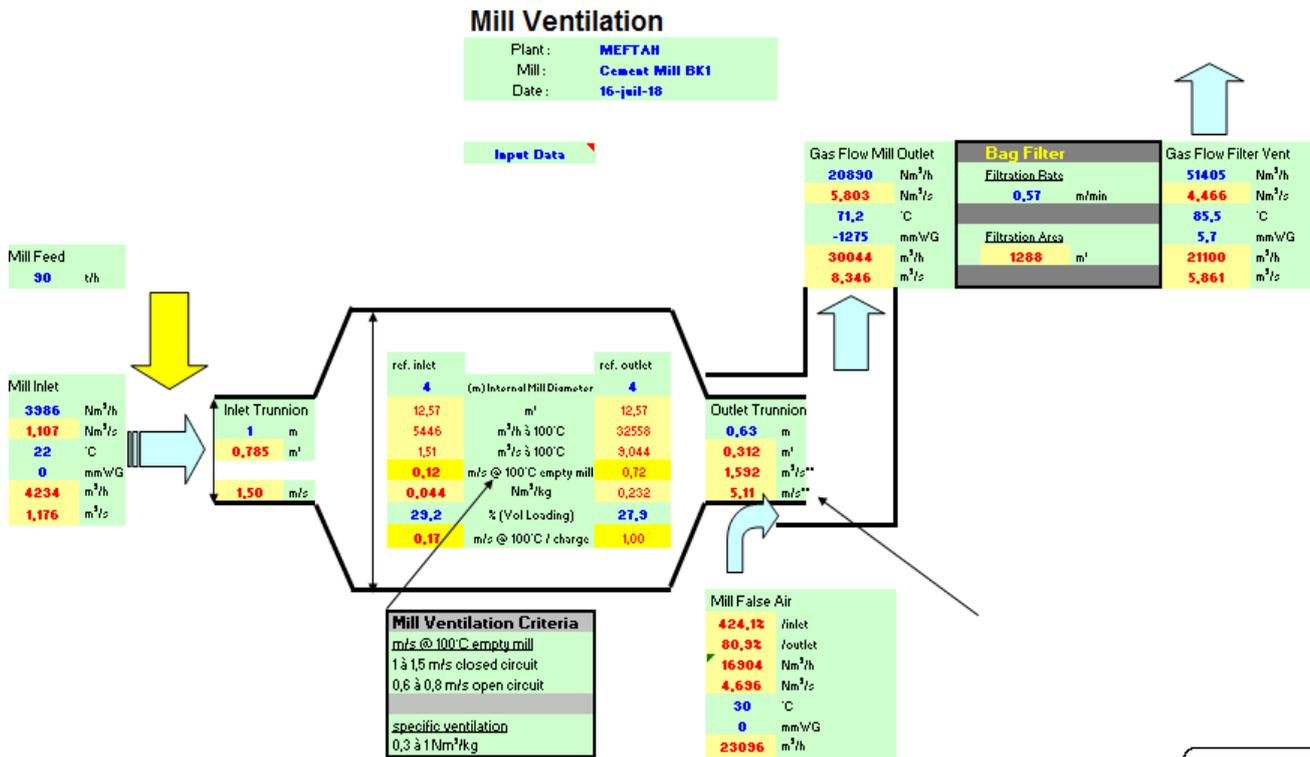


Figure 5.3 : Bilan aéraulique de l'atelier de broyage cuit (BK1) et dans le cas Idéal.



**Figure 5.4 : Ventilation broyeur.**

La vitesse de l'air dans le tube, calculée à partir du débit aéraulique mesuré à la sortie du broyeur, est de **1 m/s**, limite basse de ventilation, l'objectif étant entre **1 et 1,50 m/s**.

De la même manière, le ratio de ventilation correspondant à ce même débit aéraulique est de : **0,23 Nm<sup>3</sup>/kg** de ciment pour une cible de **0,4 à 0,6 Nm<sup>3</sup>/kg** de ciment.

Par contre, si l'on calcule la vitesse de l'air à partir du débit aéraulique mesuré à l'entrée du broyeur, on constate que celle-ci est excessivement faible : **0,12 m/s**, et que le ratio aéraulique correspondant est très faible : **0,04 Nm<sup>3</sup>/kg**. Qui plus est, ce même débit rapporté à la section du tourillon d'entrée donne une vitesse de **3,7 m/s**, sachant que **8 à 10 m/s** sont au minimum nécessaires pour assurer convenablement les fonctions de refroidissement et de transport, et favoriser la fonction de broyage.

Ces deux ratios montrent une insuffisance de ventilation dans le BK1.

Le bilan aéraulique met en évidence un écart de **16904 Nm<sup>3</sup>/h** (débit d'air sortie broyeur/ débit mesuré au tourillon d'entrée). Cet écart ne peut être totalement imputé à l'air faux.

Nous savons qu'une partie de l'air provient de la goulotte d'alimentation du broyeur, et l'autre de la conduite rejets du séparateur et qui participe donc à la ventilation du tube. Ces derniers étaient difficiles à quantifier.

Par contre, une partie non négligeable provient de l'aérogliissière de décharge du broyeur (Aérogliissière sortie broyeur), et by-pass totalement le tube (contrôlé sur site lors de l'audit) et pénalise la ventilation du broyeur et le refroidissement du ciment.

La température du ciment sortie broyeur était dans la limite de **86 °C** ainsi que celle du ciment sortie atelier qui atteint **82 °C**. Cet atelier est équipé d'un séparateur dynamique de 2ème génération avec un registre entrée d'Air frais pour refroidir en même temps le produit à l'entrée du séparateur. L'air faux provient essentiellement des fuites aux broyeurs.

Ces anomalies doivent être résolues en :

- installant un **clape/Sas dans l'aérogliissière** qui assurera deux fonctions : permettre le passage de la matière du broyeur vers l'élévateur, et entraver le passage de l'air de l'élévateur vers la gaine à sortie du broyeur
- installant un **joint de tresse** sur le tourillon de sortie

Ces actions nous permettront de nous assurer d'aspirer par le ventilateur de tirage traverse effectivement le tube du broyeur.

Dans ce chapitre, on a pu faire des testes d'optimisation à l'aide d'un logiciel de \*Lafarge\* au niveau de l'usine qui nous a permit de calculer et d'obtenir des résultats directes qui nous permettent d'avoir des solutions pratiques pour augmenter la production de l'usine c'est-à-dire le débit du ciment et économiser la consommation énergétique.

## CONCLUSION GENERALE

Le travail présenté dans ce mémoire a porté sur l'optimisation du procédé de broyeur cuit à l'unité de Meftah.

L'optimisation basée sur les bilans de broyabilité (teste axial), courbe de partage, matière et aéraulique sur le broyeur à boulets, le séparateur dynamique et le filtre à manche est effectuée par le **logiciel** de **Lafarge**.

Les résultats d'optimisation de ce procédé aux différents bilans nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'augmentation du débit de production du ciment de **90 t/h** à **128 t/h** en se basent sur 3 leviers :
  - Appoint de boulets dans les deux compartiments (charge de boulets).
  - Le tirage du filtre et l'augmentation du refus du séparateur.
  - La bonne qualité du ciment de **42,5 A** et sa résistance après **28** jours.
- Optimisation de la consommation spécifique d'énergie en utilisant la solution adjuvant de mouture facilitant l'évacuation des fines du broyeur en évitant le risque d'enrobage (agglomération) ou les minimises de la matière et aussi une meilleure ventilation dans le broyeur.
- Performance de l'atelier de broyage du ciment qui permet de qualifier le fonctionnement du broyeur, quantifier l'efficacité du séparateur et le flux de poussières de filtre.
- Fiabilité de l'atelier de broyage ciment qui est de **92%** suite aux arrêts (incident-programmé-circonstancier).



## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] A.GHERMAOUI ; «Effets de certains métaux sur les propriétés physico-chimiques des mortiers de ciment de Béni-Saf sans ou avec ajout de pouzzolane», Mémoire Master en chimie, Université ABOU-BEKR BELKAID-TLEMCEM ,2015.
- [2] S.BENNOUA, A.SALAH ; «Modélisation du procédé de séchage des matières premières à ciment de l'unité de Meftah», Mémoire Master en chimie, Université Blida ,2017.
- [3] Présentation .SCMI ; «Filial du groupe GICA », Cimenterie Meftah, 2017, Rapport interne Lafarge.
- [4] S. Catinaud; « Durabilité à long terme de matériaux cimentaire, avec ou sans fillers calcaires, en contact avec des solutions salines »; Thèse du doctorat; Université de LAVAL Canada; décembre 2000.
- [5] A. BENGUEDOUAR ; « Synthèse et caractérisation de silicates de calcium hydrates (C.S.H) hybrides », Mémoire Magister en chimie, Université de YAOUNDE I ,2013.
- [6] C. Guérandel ; « Etude de la qualité du piégeage des matières organiques par la matrice cimentaire vis-à-vis de la lixiviation », Thèse de Doctorat en Chimie analytique, l'Université Paul Verlaine – Metz, 23 Novembre 2009.
- [7] R. Chihaoui, H. Khelafi, M. Mouli, Y. Senhadji ; « Effets de la pouzzolane naturelle sur la durabilité des mortiers exposés aux attaques sulfatiques »; Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, Oran (Algeria) – October 12-14, 2009.
- [8] Le broyeur à boulets (Support Technique P et M) ; «Bringing materials to life Lafarge», Rapport interne Lafarge.
- [9] Base de conduite du broyeur à boulets ; «Atelier de broyeur à boulets», rapport interne Lafarge 39 (1996) 2131-2147.
- [10] Separators Theory and application, «Process Engineering Training- Mill grinding Segment July 26-29-2011», Rapport interne Lafarge.
- [11] D.Junique, Lafarge Ciment Viviers, Dept of studies(France) ; «Auscultation d'Atelier de broyage à boulets», Octobre 1996.
- [12] Aissa Belalia ; «Project report PLN Meftah» Avril 2013. Rapport interne.
- [13] Coltin Paxton, Direction des Performances Cimentières (DPC, France) ; «Auscultation d'Atelier de broyage à boulets»,Octobre 1996,Rapport interne Lafarge .

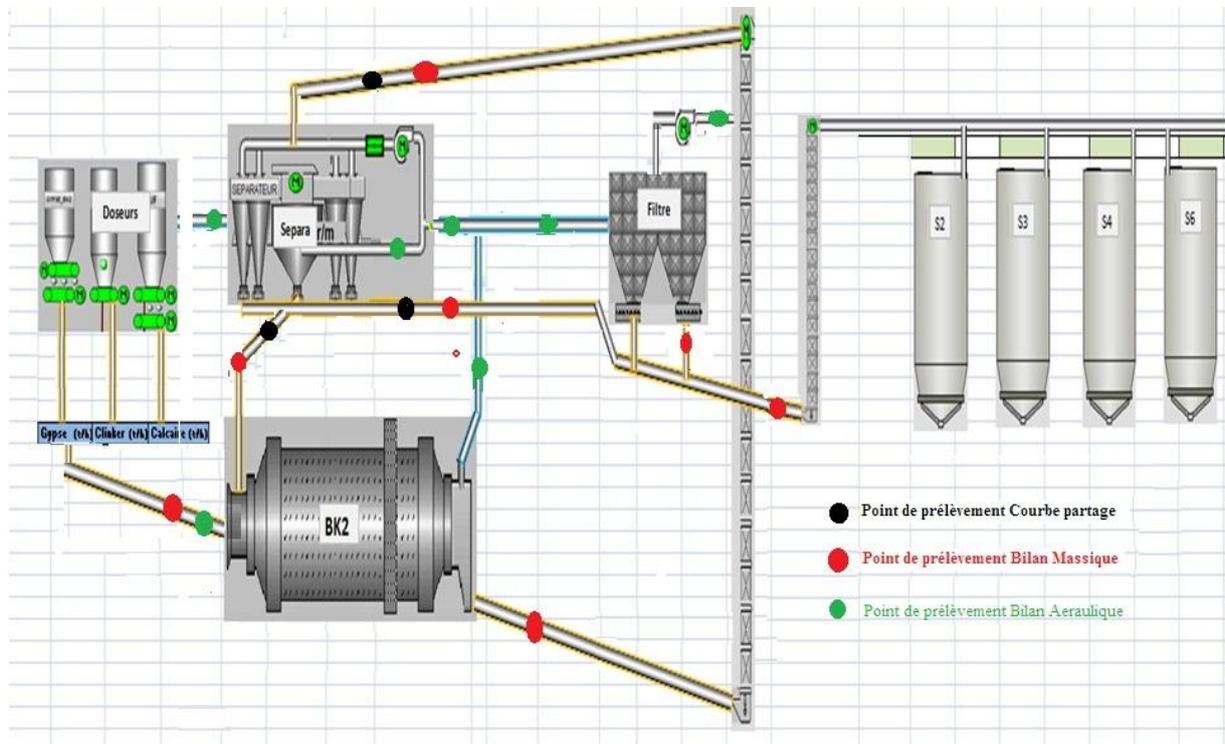


---

**Annexe 1 : Tableau Consignes de qualité du ciment**

**Annexe 1 : Tableau Consignes de qualité du ciment**

## Annexe 2 : Points d'Echantillonnages et de Prélèvements



## Annexe 3: Tableau de Refus cumulatif

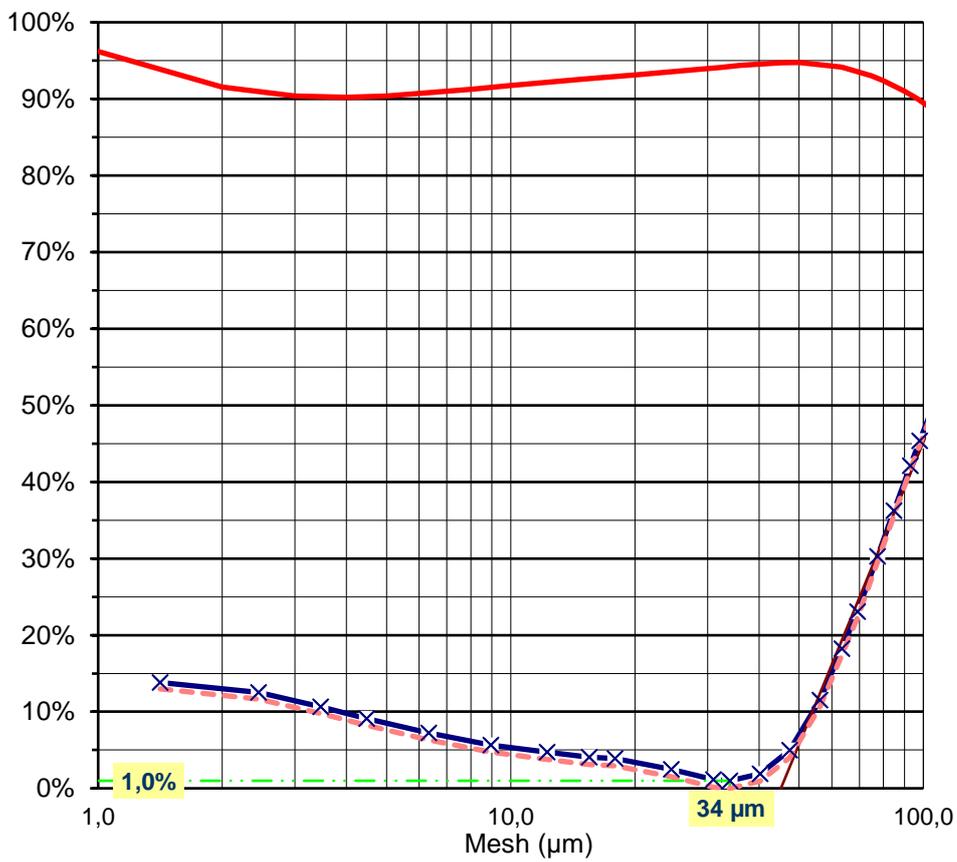
Compartment 1	Points de prélèvement	Les tailles de Tamis							
		250µm	200µm	150µm	25µm	100µm	90µm	63µm	45µm
Compartment 1	0,5m	38,12	49,20	56,20	64,51	77,24	80,40	87,60	94,50
	1,5m	29,26	38,19	50,98	58,74	66,86	70,97	78,58	84,48
	2,5m	21,26	30,89	43,43	50,70	58,40	61,51	69,76	75,12
	3,5m	20,86	30,14	42,13	49,05	56,35	59,32	67,29	72,73
	4,5m	20,53	29,71	41,57	48,41	55,65	58,60	66,51	71,95
Compartment 2	5,7m	21,21	30,39	42,05	48,68	55,57	58,34	65,72	70,80
	6,7m	19,02	27,37	38,19	44,50	51,28	54,08	61,50	67,30
	7,7m	16,84	24,56	34,89	41,10	47,99	50,78	58,81	64,70
	8,7m	13,01	19,67	29,24	35,32	42,26	45,25	53,79	60,10
	9,7m	10,37	16,19	25,03	30,90	37,81	40,84	49,70	56,40
	10,7m	8,74	13,91	22,11	27,75	34,56	37,61	46,69	53,70
	11,7m	8,57	13,65	21,71	27,30	34,10	37,16	46,34	53,40
	12,7m	9,28	13,11	23,01	28,73	36,82	35,61	47,86	54,40

## Annexe 4 : Les calculs de Courbe de partage du séparateur

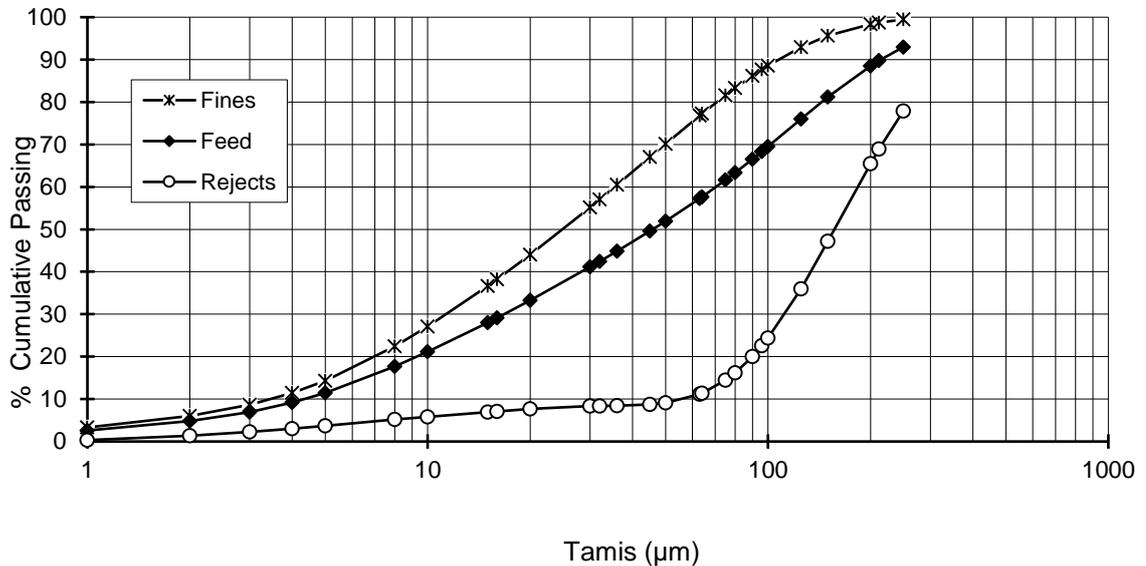
Tamis $d_i$ ( $\mu\text{m}$ )	Passant cumulé (%)			Rendement cumulé en fins	$d_x \mu\text{m} \sqrt{(d_n * d_{(n+1)})}$	fx	ax	rx	R/A fraction fx-ax/fx-rx	R. rx/A. ax P(x) %
	Produit fini (F)	Alimentation (A)	Rejet (R)	Rendement ( $1 - R/A_{\text{top}}$ ) * (Fx/Ax)						
1,00	3,31	2,59	0,33	96,2%	1,4 $\mu\text{m}$	2,74	2,21	1,03	0,310	13,8%
2,00	6,05	4,80	1,36	91,5%	2,4 $\mu\text{m}$	2,62	2,15	0,88	0,270	12,5%
3,00	8,67	6,95	2,24	90,4%	3,5 $\mu\text{m}$	2,79	2,26	0,78	0,264	10,7%
4,00	11,46	9,21	3,02	90,2%	4,5 $\mu\text{m}$	2,85	2,26	0,67	0,271	9,1%
5,00	14,31	11,47	3,69	90,4%	6,3 $\mu\text{m}$	8,09	6,19	1,48	0,287	7,2%
8,00	22,40	17,66	5,17	91,2%	8,9 $\mu\text{m}$	4,69	3,48	0,66	0,300	5,7%
10,00	27,09	21,14	5,83	91,8%	12,2 $\mu\text{m}$	9,54	6,87	1,11	0,317	4,7%
15,00	36,63	28,01	6,94	92,6%	15,5 $\mu\text{m}$	1,61	1,15	0,16	0,317	4,1%
16,00	38,24	29,16	7,10	92,7%	17,9 $\mu\text{m}$	5,77	4,09	0,55	0,322	3,9%
20,00	44,01	33,25	7,65	93,1%	24,5 $\mu\text{m}$	11,18	7,89	0,67	0,313	2,5%
30,00	55,19	41,14	8,32	94,0%	31,0 $\mu\text{m}$	1,86	1,30	0,05	0,309	1,1%
32,00	57,05	42,44	8,37	94,1%	33,9 $\mu\text{m}$	3,42	2,42	0,08	0,299	1,0%
36,00	60,47	44,86	8,45	94,4%	40,2 $\mu\text{m}$	6,57	4,73	0,30	0,293	1,9%
45,00	67,04	49,59	8,75	94,7%	47,4 $\mu\text{m}$	3,10	2,32	0,38	0,287	5,0%
50,00	70,14	51,91	9,13	94,7%	56,1 $\mu\text{m}$	6,68	5,35	2,04	0,287	11,5%
63,00	76,82	57,26	11,17	94,2%	63,5 $\mu\text{m}$	0,44	0,39	0,23	0,238	18,2%
64,00	77,26	57,65	11,40	94,1%	69,3 $\mu\text{m}$	4,34	3,98	3,05	0,279	23,1%
75,00	81,60	61,63	14,45	93,0%	77,5 $\mu\text{m}$	1,68	1,70	1,71	0,667	30,3%
80,00	83,28	63,33	16,16	92,4%	84,9 $\mu\text{m}$	2,91	3,21	3,88	0,309	36,3%
90,00	86,19	66,54	20,04	91,0%	93,0 $\mu\text{m}$	1,50	1,82	2,56	0,302	42,1%

96,00	87,69	68,36	22,60	90,1%	98,0 $\mu\text{m}$	0,91	1,16	1,77	0,291	45,3%
100,00	88,60	69,52	24,37	89,5%	111,8 $\mu\text{m}$	4,33	6,48	11,59	0,296	53,3%
125,00	92,93	76,00	35,96	85,9%	136,9 $\mu\text{m}$	2,70	5,20	11,22	0,293	63,9%
150,00	95,63	81,20	47,18	82,6%	173,2 $\mu\text{m}$	2,75	7,32	18,28	0,294	73,9%
200,00	98,38	88,52	65,46	77,9%	205,9 $\mu\text{m}$	0,36	1,28	3,47	0,296	80,4%
212,00	98,74	89,80	68,93	77,0%	230,2 $\mu\text{m}$	0,72	3,17	8,99	0,296	84,2%
250,00	99,46	92,97	77,92	74,9%					R/A Moy=0.299	

### Annexe 5 : Courbe de partage du séparateur



## Annexe 6: Courbe de Tromp (partage)



## Annexe 7 : Tableau Principaux paramètres de la courbe de Tromp (partage)

Principaux paramètres de la courbe de Tromp (Partage)					
R / A	0,299	Charge circulante	43%	D25	70,1 µm
Rendement cumulé en fin	96,2%	By-pass	1,0%	D50	108,8 µm
		By-pass	34 µm	D50	168,8 µm
		Limite d'acuité	0,45	D75	
		Imperfection	0,50		
		Imperfection			

## Annexe 8 : Tableau Détermination de Pourcentage des Refus (Bilan massique)

Débit (t/h)	
Cc	0,34825114 (35%)
Q <sub>A</sub>	90
$Q_{SF} = Q_A * ((R_C - R_{SS}) / (R_{SF} - R_{SS}))$	$90 * ((28,12 - 29,47) / (19,9 - 29,47)) = 12,62$
$Q_{SS} = Q_A - Q_{SF}$	$90 - 12,62 = 77,37$
$Q_R = Q_{SS} * (R_{SS} - R_{ES}) / (R_{ES} - R_R)$	$77,37 * (29,47 - 45,5) / (45,5 - 91,53) = 26,94$
$Q_{ES} = Q_{SS} + Q_R$	$77,37 + 26,94 = 104,32$









## Annexe 9

## Tableau Détermination Bilan aéraulique (Anémomètre et Tube Pitot)

	Points de prélèvement	Température $\theta^\circ$	Pression statique	Pression dynamique moyen = $[\sum VPd/n] 2$	Masse volumique $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Vitesse lecture dire cte Vitesse moy(m/s)= $k \cdot v$ (2Pdmoy/ $\rho$ )	Section (m <sup>2</sup> ) S= Diamètre(D) 2 $\cdot \pi / 4$ S = Longueur(L) * Largeur (l)	Débit (m <sup>3</sup> /s)= $V_{moy} (m/s) \cdot S$ (m <sup>2</sup> )	Débit (Nm <sup>3</sup> /s)=(m <sup>3</sup> /s)* P°&T° correction	Débit (Nm <sup>3</sup> /h) = Q (m <sup>3</sup> /s) * 3600
Par l'anémomètre	Entrée broyeur	15	0			3,78	$0,63 \cdot 0,63 \cdot \pi / 4 = 0,312$	$3,78 \cdot 0,312 = 1,18$	$(1,18 \cdot 273) / (273 + 15) \cdot (10336 / 10336) = 1,11$	3 986
	Air frais entrée séparateur	15	0			3,32	$1,53 \cdot 0,59 = 0,867$	$3,32 \cdot 0,867 = 2,88$	$(2,88 \cdot 273) / (273 + 15) \cdot (10336 / 10336) = 2,70$	9 729
Par tube de Pitot	Sortie broyeur	71	-1275,4	499,77	1,309	$0,86 \cdot v$ $(2 \cdot 499,77 / 1,309) = 2$ 3,77	$0,63 \cdot 0,63 \cdot \pi / 4 = 0,312$	$23,77 \cdot 0,312 = 7,4$ 1	$(7,41 \cdot 273) / (273 + 71) \cdot (10336 + 1275,4 / 10336) = 5,80$	20 890
	Sortie séparateur	72	-2883,6	51,85	1,09	$0,86 \cdot v$ $(2 \cdot 51,85 / 1,09) = 8,39$	$1 \cdot 1 \cdot \pi / 4 = 0,79$	$8,39 \cdot 0,79 = 6,59$	$(6,59 \cdot 273) / (273 + 72) \cdot (10336 + 2883,6 / 10336) = 5,07$	18 234
	Air de recirculation	77	-185,6	251,82	1,053	$1 \cdot v$ $(2 \cdot 251,82 / 1,053) = 2$ 1,87	$1,7 \cdot 1,45 = 2,37$	$21,87 \cdot 2,37 = 51,7$ 6	$(51,76 \cdot 273) / (273 + 77) \cdot (10336 + 185,6 / 10336) = 40,30$	145 080
	Sortie VT filtre	56	411,5	439,88	1,075	$1 \cdot v$ $(2 \cdot 439,88 / 1,075) = 2$ 8,61	$0,7 \cdot 0,89 = 0,6$	$28,61 \cdot 0,6 = 17,11$	$(28,61 \cdot 273) / (273 + 56) \cdot (10336 + 411,5 / 10336) = 14,28$	51 405

**Annexe 9**

**Tableau Détermination Bilan aéraulique (Anémomètre et Tube Pitot)**

