

Faculté des Sciences et Techniques de Fès



Département de Génie Industriel



LST de Génie Industriel

Projet de Fin d'Etudes

Optimisation de la consommation
énergétique au niveau du broyeur
BK4

Lieu : HOLCIM Fès

Ref : 20/15 GI

Préparé par :

- Belfakih Ilham
- Taghbalout Meryem

Soutenu le 17 Juin 2015 devant le jury composé de :

- Pr . Mohammed Cherkani Hassani
- Pr . Tahri Driss
- Pr. Hamedi L'Habib
- Mr.Kassaoui

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude et notre plus haute reconnaissance, en premier lieu, à notre encadrant Monsieur **Mohammed Cherkani-Hassani** pour tout le temps qu'il nous a consacré et tous les conseils qu'il nous a prodigué durant notre Projet Industriel de Fin d'Etudes.

Nous tenons à remercier aussi HOLCIM-FES de nous avoir accueilli tout au long de notre Projet Industriel de Fin d'Etudes au sein du service production.

Nous remercions particulièrement :

Monsieur **Kassaoui Mostapha** notre parrain industriel, chef-ingénieur du service production à la société HOLCIM-Fès, Ses précieux conseils nous ont été d'une grande aide, ainsi que la patience et la compréhension dont il a fait preuve à l'égard de notre rythme de travail. Il nous a confié la liberté et la responsabilité de mener à bien ce projet, tout en nous encourageant et en nous soutenant.

Tous le *corps professionnel au sein de HOLCIM*, pour leur soutien quotidien durant les deux mois de stage. L'ambiance chaleureuse et amicale qu'ils font régner sur les lieux de travail a contribué à la réussite de notre stage.

Sommaire

Liste des figures.....	5
Liste des tableaux	6
Lexique	7
Introduction.....	8
Chapitre I :Présentation de général de HOLCIM.....	9
Présentation du Groupe Holcim.....	9
II. Holcim Maroc.....	9
1. Répartition du capital de Holcim Maroc.....	9
2. Activité.....	10
3. Historique.....	10
4. Hygiène et sécurité.....	11
III. Usine de Fès – Ras El Ma.....	12
1. Situation géographique et accessibilité.....	12
2. Activité.....	12
3. Organigramme.....	12
Chapitre II: Fabrication De Ciment	13
Processus de fabrication	13
1. Extraction des matières premières.....	14
2. Concassage et pré-homogénéisation.....	15
3. Broyage et homogénéisation de la farine crue.....	16
4. Production du clinker :.....	17
5. Broyage de ciment.....	19
6. Ensachage et expédition du ciment.....	20
II. Les différentes qualités de ciment.....	21
Cahier De Charge.....	22

Chapitre III : Présentation De Circuit De Broyage	23
Introduction.....	23
II. Circuit de broyage.....	23
III. Présentation du broyeur BK4.....	24
1- <i>Principe de fonctionnement du broyeur</i>	24
2- <i>Entrainement complet du broyeur</i>	26
IV. Présentation du foyer sécheur	27
Chapitre IV : Gestion Énergétique Du Broyeur BK4	29
I. Problématique.....	29
II. Ressources énergétiques :	30
1. <i>Energie électrique</i>	30
2. <i>Energie thermique</i>	31
III. <i>Etude de la consommation énergétique</i>	32
1. <i>Consommation Electrique spécifique</i>	32
2. <i>Consommation calorifique spécifique broyage ciment</i>	34
IV. Causes de la surconsommation énergétique.....	36
1. <i>Diagramme d'Ishikawa</i>	36
2. <i>Analyse des causes</i>	37
V. Recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique	44
1. <i>Solutions pour réduire les pertes énergétiques analysées précédemment</i>	44
2. <i>Optimisation de la CES en utilisant la méthode simplexe</i>	49
Conclusion.....	52
Bibliographie	53

Listes des figures et tableaux

Liste des figures

Figure 1 : Répartition des sites de Holcim Maroc

Figure 2 : Organigramme de l'usine de Fès

Figure 3 : Vue aérienne de l'usine de Fès

Figure 4: Flow sheet du concasseur

Figure 5 : Flow sheet du broyeur cru

Figure 6 : Flow sheet du circuit de cuisson

Figure 7: Flow sheet du broyeur ciment BK4

Figure 8 : Flow sheet ensachage et expédition

Figure 9 : Flow sheet du circuit de broyage de ciment

Figure 10 : Broyeur vertical à galets Loesche

Figure 11: Moteur du broyeur

Figure 12 : Flow sheet du foyer sécheur

Figure 13 : Bruleur Fuel

Figure 14 : Schéma de principe de fonctionnement d'un bruleur Fuel

Figure 15: Compresseur KAESER DSD 171

Figure 16 : Dépotage du Fioul

Figure17 : Diagramme des fluctuations de CES du mois Mars

Figure 18: Diagramme des fluctuations de la consommation du mois Mars

Figure 19 : Diagramme cause-effets pour la surconsommation énergétique

Figure 20: Diagramme Pareto Broyeur BK4

Figure 21 : Agents de moutures

Figure 22 : Résolution du programme dans l'Excel

Liste des tableaux

Tableau 1 : Différentes qualités de ciment et leurs usages

Tableau 2: Plaque signalétique du moteur broyeur

Tableau 3: Caractéristiques du réducteur

Tableau 4 : Plaque signalétique du Compresseur

Tableau 5 : CES du mois Mars avec relevé de production journalière

Tableau 6 : Consommation thermique spécifique du mois mars avec relevé de production

Tableau 7 : L'énergie influencée par différents causes

Tableau 8 : les tranches horaires et le prix du kWh pour chaque tranche

Tableau 9 : Matrice multicritère

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des données pour la construction du diagramme Pareto des arrêts du broyeur BK4

Tableau 11: Plan d'actions

Tableau 12 : Répartition des heures de marche réelle et des kW consommés selon chaque qualité

Lexique :

Consommation électrique spécifique : est le rapport entre la somme des énergies consommées par les différents consommateurs (Moteur, ventilateur, Auxiliaires) et la quantité de ciment produite. Son unité est kWh/t

Energie thermique spécifique : est le rapport entre le tonnage du fuel consommé multiplié par son pouvoir calorifique et la production. Son unité est MJ/t

Diagramme Pareto : est un graphique représentant l'importance de différentes causes sur un phénomène. Ce diagramme permet de mettre en évidence les causes les plus importantes sur le nombre total d'effet et ainsi de prendre des mesures ciblées pour améliorer une situation.

L'algorithme du simplexe : est un algorithme de résolution des problèmes d'optimisation linéaire. C'est probablement le premier algorithme permettant de minimiser une fonction sur un ensemble défini par des inégalités. L'algorithme du simplexe a longtemps été la méthode la plus utilisée pour résoudre les problèmes d'optimisation linéaire.

Introduction

Dans ce monde secoué par la crise énergétique et face à l'offre insuffisante par rapport à la demande accrue, il importe que toutes les entreprises puissent procéder à une bonne maîtrise de leur consommation énergétique. Ceci, d'une part pour diminuer la consommation énergétique qui est synonyme de gain de profit pour l'entreprise et d'autre part pour soulager la demande. Pour cela, les entreprises doivent nécessairement optimiser les conditions de fonctionnement de leurs équipements assurant ainsi un rendement optimal pour ces derniers.

Holcim-Fès a mis en service le broyeur vertical à ciment en 2002, une installation qui a pour rôle de broyer le clinker avec des ajouts afin de produire le produit fini qui est le ciment.

Le broyeur à galets de type vertical réalise plusieurs fonctions principales dans une seule machine : le broyage, Le séchage et la séparation. Afin d'assurer ces différentes fonctions, le broyeur BK4 exige une quantité d'énergie considérable quelle soit énergie électrique ou thermique.

L'objectif de notre stage est de faire un suivi de la consommation énergétique spécifique du broyeur BK4, d'étudier et analyser les différentes causes de la surconsommation dans le but de fixer des solutions permettant de réduire les pertes et d'améliorer l'efficacité énergétique.

Afin d'atteindre ces objectifs, nous avons consacré le premier chapitre à la présentation de la société Holcim.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté le processus de fabrication et les différentes qualités de ciment produites par Holcim.

Ensuite, le troisième chapitre présente de façon détaillée le circuit de broyage et le principe de fonctionnement du broyeur vertical et du foyer sécheur.

Finalement, le quatrième chapitre est consacré à étudier et analyser les causes de surconsommation d'énergie. Pour cela nous avons procédé à une étude basée sur l'analyse des 5M ou diagramme d'ISHIKAWA. Et ensuite nous avons fait des recommandations afin de remédier aux pertes énergétiques engendrés par les causes étudiées dans le chapitre qui précède et puis nous avons proposé une solution d'optimisation de la consommation des heures de travail de broyeur bk4 selon les prix des tranches horaires et les différentes qualités de ciment produits en se basant sur la méthode de programmation Simplex .

Chapitre I : Présentation de la société

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter en premier lieu Holcim Maroc, son activité et son historique puis l'usine de Fès, où nous avons effectué notre stage.

I. Présentation du Groupe Holcim

D'origine suisse, le Groupe Holcim Ltd est un acteur majeur au niveau mondial dans la production de ciment, granulats et bétons.

Holcim compte parmi les leaders de la production de matériaux de construction car il se concentre sur ses produits de base, en particulier la production et la distribution de ciments et granulats.

Actif dans près de 70 pays, le groupe Holcim offre la plus grande diversité géographique du marché. Présent aussi bien en Europe que dans les pays émergents, sa diversification géographique assure la solidité de son économie.

Gérer l'approche locale et globale est au cœur de la dynamique de Holcim. Le Groupe est un acteur global, mais reste très ancré localement. L'importance des coûts de transport, notamment, incite le Groupe à être proche de ses clients.

II. Holcim Maroc

1. Répartition du capital de Holcim Maroc

Aujourd'hui Holcim est présente dans différentes régions du Maroc et dispose d'une capacité annuelle de production de 3,9 millions de tonnes, elle exploite trois cimenteries à Oujda, Fès et Settat, un centre de broyage, d'ensachage et de distribution à Nador, ainsi qu'un centre de distribution à Casablanca



Figure 1 : Répartition des sites de Holcim

2. Activité

Créée en 1976, Holcim (Maroc) est un groupe spécialisé dans la production et la commercialisation de tous les liants hydrauliques employés dans la construction et les travaux publics, notamment le clinker (produit semi-fini du ciment), le ciment, le béton et les granulats

3. Historique

1972 : Construction de la cimenterie d'Oujda, sous le nom de la cimenterie Maghrébine (CIMA). Son capital est de 75 millions de dirhams, réparti à égalité entre l'Office de Développement Industriel (ODI) et la SNMC, organismes représentant respectivement le Maroc et l'Algérie.

1979 : Mise en service l'usine d'Oujda qui démarre avec une capacité de production de 1,2 millions de tonnes /an.

1980 : Installation à Fès d'un centre d'ensachage d'une capacité de 500 000 tonnes/ an.

1989 : Installation d'un centre de broyage à Fès d'une capacité de 350 000 tonnes/an.

1990 : Début des travaux pour la réalisation d'une ligne complète de production de clinker à Fès et le lancement de l'activité BPE avec l'installation de la première centrale de béton à Fès.

1993 : Démarrage de la deuxième cimenterie à Ras El Ma dans la région de Fès, avec une capacité de 600 000 tonnes/an, pour répondre aux besoins croissants du marché national.

2001 : Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 de la cimenterie de Fès.

2002 : Changement de l'identité visuelle : CIOR devient Holcim Maroc. Démarrage de la nouvelle activité granulats (Benslimane).

2004 : Extension de la cimenterie de Fès.

2007 : Démarrage de la cimenterie de Settat et de la plateforme de prétraitement de déchet Ecoval.

2008 : Lancement du projet de doublement de capacité de production de l'usine de Fès.

2009 : Création du premier réseau de distribution des matériaux de construction au Maroc : BATIPRO distribution.

2010 : Lancement du projet de doublement de la capacité de production clinker de la cimenterie de Fès.

4. Hygiène et sécurité

Conformément aux stipulations législatives relatives à l'hygiène et sécurité, Holcim (Maroc) assure la protection de la santé et de la sécurité de ses salariés, dispose d'un médecin du travail et a mis sur pied un comité d'hygiène et de sécurité.

Ce comité a mis en place un plan d'actions visant à promouvoir et à maintenir un haut degré de bien-être physique, mental et social des travailleurs. En effet, Holcim (Maroc) contrôle l'environnement de travail (poussières, bruit, etc.) et assure une surveillance médicale périodique de son personnel.

Les cadres de la Société définissent et s'engagent à mettre en place une politique d'hygiène et sécurité et à en assurer les performances. Ils sont tenus également d'assurer une communication interne et une diffusion efficace de l'information nécessaire sur l'hygiène et sécurité, à travers des rapports, des séances de sensibilisations, des formations, etc.

En contrepartie, Holcim (Maroc) exige de ses collaborateurs la maîtrise et le respect des procédures et des instructions, ainsi que l'obtention d'un permis de travail. Chaque collaborateur se doit de connaître son rôle, ses responsabilités et ses obligations.

La direction de la Société réalise des audits de conformité légale des différents sites, ainsi que des audits de conformité d'hygiène du milieu de travail, des installations sanitaires et de restauration.

Elle assure également une évaluation et un contrôle continu des risques et examine systématiquement les incidents parvenus pour pouvoir mettre en place des mesures correctives.

Par ailleurs, le système d'hygiène et sécurité intervient au niveau des procédés, notamment en ce qui concerne la procédure d'approvisionnement (procédure des achats, évaluation des fournisseurs et prestataires, etc.), la conception des produits, la gestion des changements, l'hygiène industrielle, etc.

III. Usine de Fès – Ras El Ma

1. Situation géographique et accessibilité

La cimenterie de Fès est située dans la localité de Ras El Ma à 25 Km de la ville de Fès et à 340 Km du port de Nador à partir duquel elle est alimentée en pet coke.

La liaison routière avec les autres régions du Royaume se fait à partir de l'autoroute reliant Casablanca et Oujda, tandis que l'accès à la ville de Fès se fait directement via les localités de Bensouda et de Zlilig. L'usine est raccordée à la voie ferrée depuis 2005.

2. Activité

L'usine de Fès - Ras El Ma a été mise en service en 1993 et ne produit que du clinker pendant les trois premières années de son activité. Depuis 1996, l'usine de Fès Ras El Ma produit et commercialise différentes qualités de ciment.

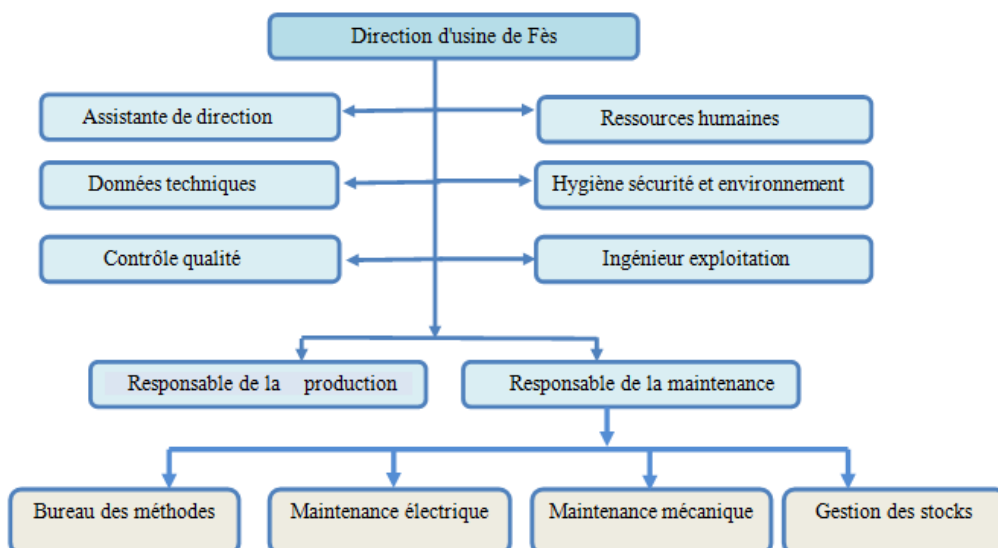
L'unité de production de Fès - Ras El Ma utilise le procédé de fabrication à voie sèche intégrale.

L'usine comprend des ateliers de concassage, de broyage, d'homogénéisation et de stockage de la farine, de cuisson et stockage du clinker, de broyage du ciment et d'ensachage et expédition du ciment.

La production s'effectue à partir de matières premières extraites de la carrière de calcaire et de la carrière de schiste, les deux se situant à proximité de l'usine.

L'usine de Fès est dotée des certificats de conformité aux normes ISO 9001 de la gestion de la qualité, ainsi que la norme relative au management environnemental ISO 14001.

3. Organigramme



Chapitre II : La fabrication de ciment

Introduction

Dans le présent chapitre, nous allons expliquer de façon assez brève, le processus de fabrication de ciment ainsi que les différentes qualités produites à Holcim Fès.

I. Processus de fabrication

Le processus de fabrication du ciment est un processus complexe et graduel par voie sèche, dans lequel la matière subit à partir de la carrière des transformations successives jusqu'au produit fini.

La fabrication du ciment est un procédé qui exige un savoir-faire, une maîtrise des outils et des techniques de production, des contrôles rigoureux et continus de la qualité.

La production du ciment s'opère selon un processus en six étapes :

- Extraction des matières premières
- Concassage et pré-homogénéisation des matières crues
- Broyage et homogénéisation de la matière crue
- Production du clinker
- Broyage du ciment
- Expédition du ciment

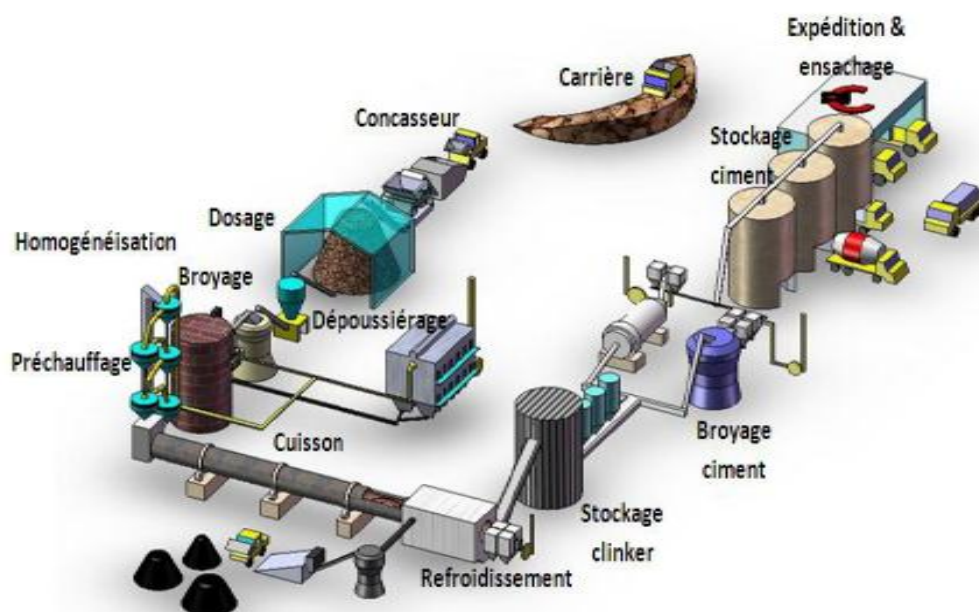


Figure 3 : Vue aérienne de l'usine de Fès

1. *Extraction des matières premières*

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif.

Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps.

Le cimentier utilise aussi des matières qui sont emportées de différentes régions du Maroc.

Les matières premières utilisées durant le processus de fabrication sont :

Le calcaire : qui représente 80% du tonnage des matières premières est extrait des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert à proximité de l'usine par abattage à l'explosif. La pureté du calcaire est caractérisée par sa teneur en carbonate de calcium CaCO_3 .

Le Schiste : est constitué de 20% de Al_2O_3 et de proportion très faible en SiO_2 et Fe_2O_3 . Pour augmenter ces proportions faibles on le mélange avec l'argile et les minerais de Fer. Le taux moyen de schiste en cru est de 14%.

Le gypse : est utilisé comme régulateur de prise dans le ciment à cause de la présence du sulfate de calcium, il est ajouté en faible quantité aux autres constituants du ciment au cours de sa fabrication.

La pouzzolane : une matière siliceuse possédant en elle-même peu de propriétés de prise mais qui finement divisée et en présence de chaux, réagit avec l'hydroxyde de chaux à la température ordinaire pour former un composé ayant les propriétés d'un ciment. La pouzzolane est d'origine volcanique, elle améliore la qualité hydraulique des ciments.

La Fluorine : une espèce minérale composée de Fluorure de Calcium de formule idéale CaF_2 est apportée d'un gisement à proximité de la région d'Azrou. Elle est utilisée en faible quantité dans le mélange cru pour obtenir des effets particuliers pendant la cuisson, c'est-à-dire qu'elle permet d'activer le processus de formation de clinker. De plus ce composé permet avant tout d'augmenter le débit et de réduire la consommation calorifique du four en baissant la température de 1450 à 1200.

2. Concassage et pré-homogénéisation

- *Concassage :*

Extraites sous forme de bloc de grosse dimension, les matières premières extraites des carrières sont concassées afin de faciliter leur manutention pour les étapes postérieures. Les concasseurs utilisés dans les usines de Holcim (Maroc) sont à impact à battoirs ou marteaux. Ce type de concasseur est adapté aux caractéristiques initiales et finales des matières à concasser.

Les matières premières sont transportées par des engins mécaniques (pelles mécaniques, chenilles, camions bennes, etc.) lors des phases d'extraction et d'alimentation du concasseur, ainsi que pour l'acheminement des ajouts

- *Pré-homogénéisation :*

Les matières premières concassées sont acheminées vers un hall de stockage et de pré-homogénéisation. Cette opération permet d'améliorer l'homogénéité de la matière et de réduire les fluctuations du procédé, grâce à des tests et analyses réalisés dans les laboratoires de l'usine.

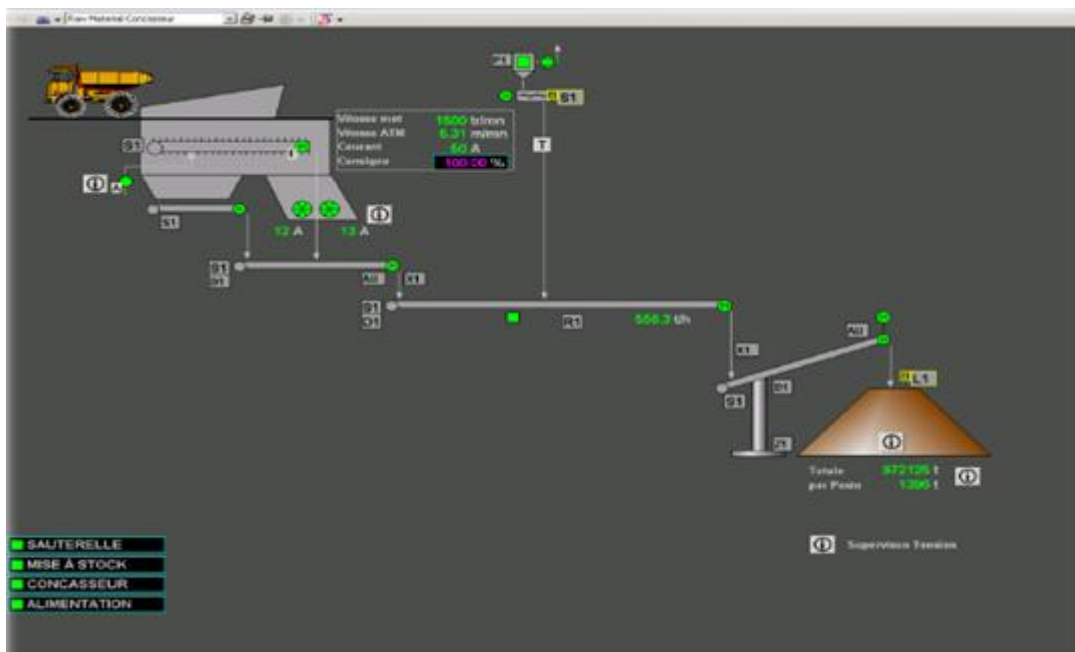


Figure 4: Flow sheet du concasseur

3. Broyage et homogénéisation de la farine crue

- *Broyage cru*

La matière crue est constituée d'un mélange des différentes matières premières et de correction dans des proportions qui sont définies suivant les valeurs des modules chimiques du cru.

En général, la matière crue est constituée de 84% de calcaire, 11 % de schistes et 1% à 5 % de matières de corrections (sable et fer). Le dosage des différentes composantes est systématisé de manière automatique à l'entrée du broyeur.

Ce mélange est broyé et séché dans un broyeur vertical à galets. Cette opération de broyage permet de réduire la granulométrie du mélange.

Le séchage de la matière crue à l'intérieur du broyeur est assuré par les gaz chauds du four.

- *Homogénéisation*

A la sortie du broyeur cru, le mélange des matières broyées, appelé farine crue est stocké dans un ou plusieurs silos de stockage et d'homogénéisation.

Dans ces silos, la farine crue est homogénéisée par soufflage d'air sur-pressé. Cette opération permet d'améliorer la régularité des caractéristiques de la farine crue afin d'obtenir ensuite un clinker de qualité régulière.

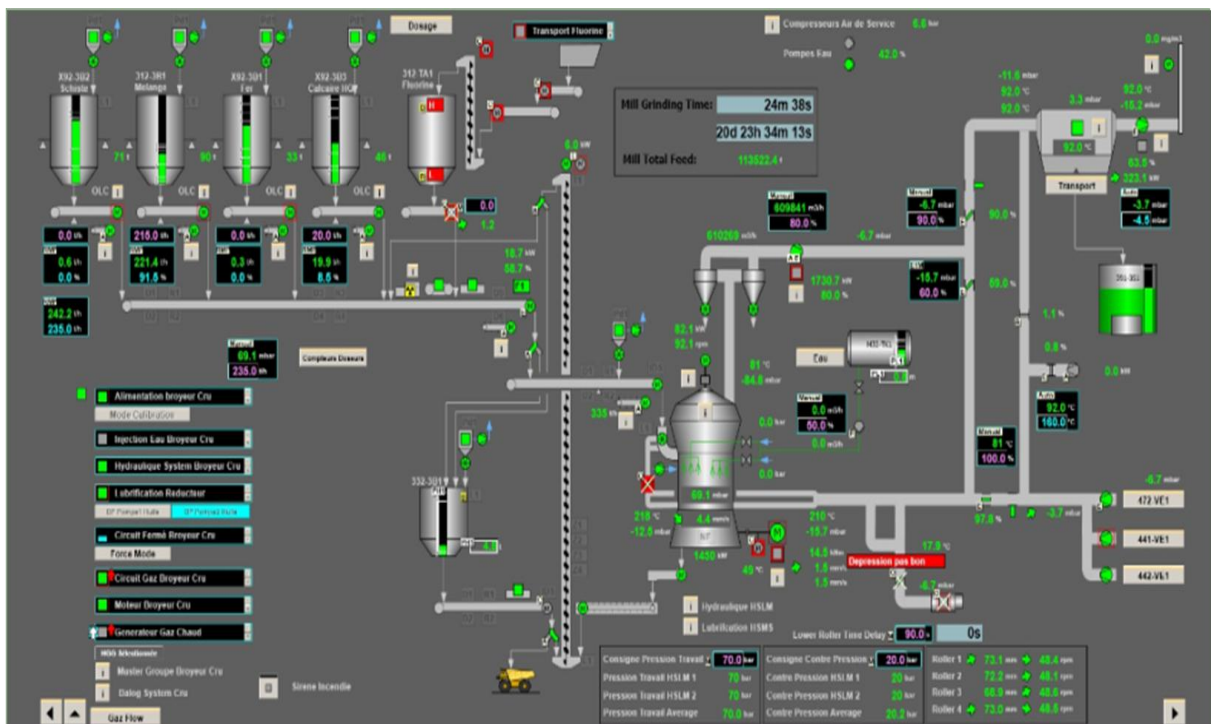


Figure 5 : Flow sheet du broyeur cru

4. *Production du clinker :*

Le clinker est un produit artificiel obtenu par la cuisson de la farine crue dans un four rotatif.

La production du clinker se fait en quatre étapes:

- Le séchage et le préchauffage de la farine crue.
 - La décarbonatation partielle de la farine crue.
 - La clinkérisation.
 - Le refroidissement du clinker.
- *Séchage et préchauffage et décarbonatation partielle de la farine*

La farine crue est introduite et dosée au pied de la tour de préchauffage. Par la suite, elle est manutentionnée jusqu'au haut de la tour où elle est introduite au niveau du quatrième ou du cinquième étage.

Dans la tour de préchauffage, la farine crue avance du haut vers le bas et se mélange avec les gaz chauds du four circulant dans le sens inverse. Ce procédé permet de préchauffer la farine crue jusqu'à une température de près 800 °C au pied de la tour et de provoquer la première transformation (décarbonatation partielle) de ses principaux composants chimiques (carbonates, silicates, aluminates, etc.).

- *Clinkérisation (production du clinker)*

La farine crue, qui a été partiellement décarbonatée dans la tour de préchauffage, est introduite dans un four rotatif pour entamer le processus de clinkérisation.

La clinkérisation consiste en la combinaison des principaux composants de la farine crue (carbonates, silicates, aluminates, etc.) sous l'effet de la chaleur du gaz du four (1 400 °C), pour former des minéraux artificiels qui confèrent au clinker ses propriétés hydrauliques. Les proportions de ces minéraux doivent rester dans des limites définies afin d'assurer une bonne qualité du clinker.

L'énergie thermique nécessaire pour assurer la cuisson de la farine crue dans le four, est produite par la combustion du pet coke qui est introduit dans le four par une tuyère spéciale.

En plus du pet coke, on utilise des combustibles alternatifs (huiles usagées, pneus déchiquetés, etc.) en vue de réduire les coûts de l'énergie thermique

- *Refroidissement du clinker :*

A la sortie du four, le clinker est introduit dans un refroidisseur à ballonnets ou à grilles où il est refroidi jusqu'à une température de 120 °C. Cette opération permet de récupérer la chaleur du clinker pour la réutiliser et de faciliter sa manutention jusqu'aux silos de stockage.

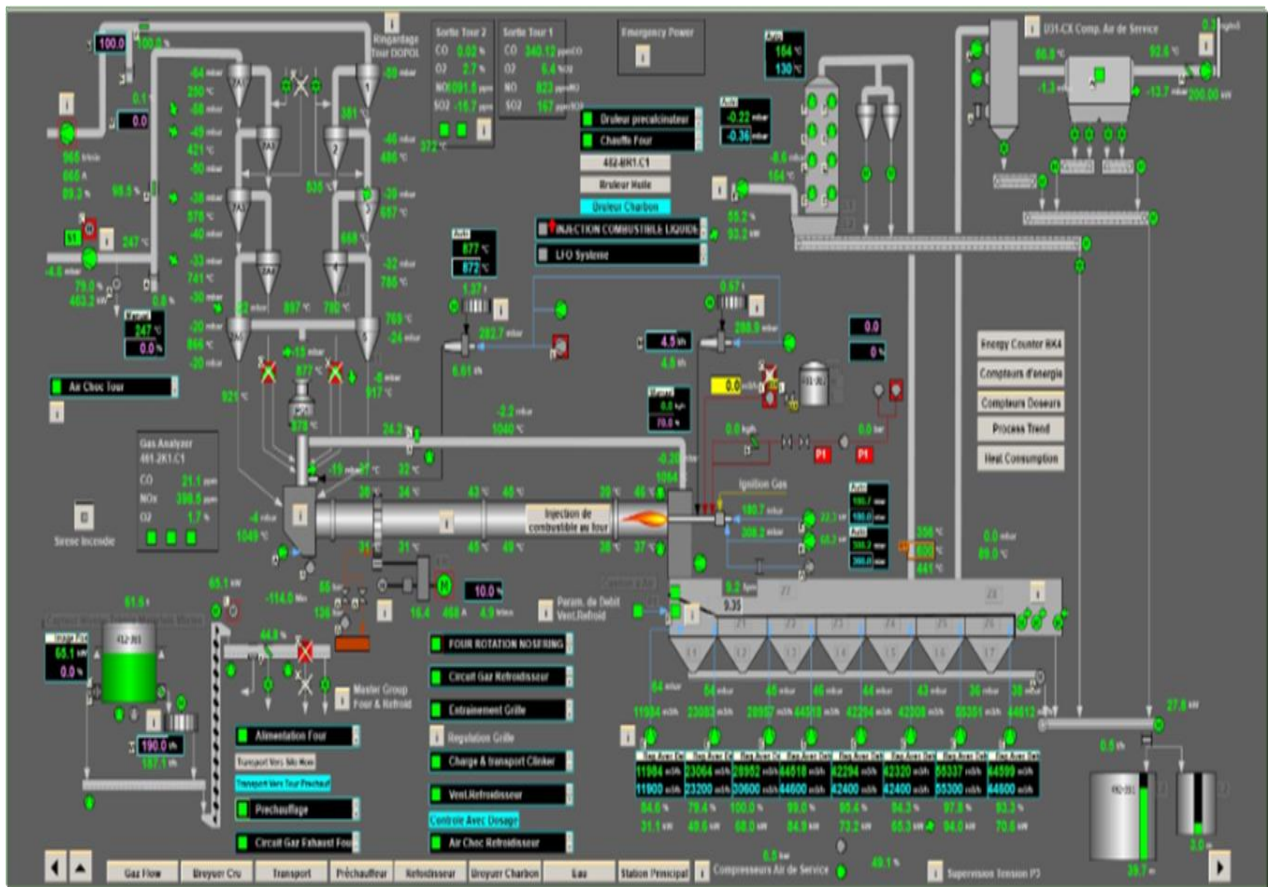


Figure 6 : Flow sheet Du Circuit De Cuisson

5. Broyage de ciment

Le clinker et les ajouts (gypse, calcaire et pouzzolane) sont introduits au niveau d'un broyeur vertical à galets, dans des proportions prédéfinies pour subir des efforts mécaniques du broyage et produire ainsi le ciment dont la finesse évolue de 2 800 à 4 000 cm²/g.

Le dosage du clinker et des ajouts se fait à l'entrée du broyeur par un système de dosage automatique.

Les caractéristiques des différentes lignes de gamme de ciment obtenues sont conformes aux normes marocaines de production du ciment. Cette conformité est assurée grâce à des dosages mesurés et des tests de laboratoire effectués tout au long du processus de production

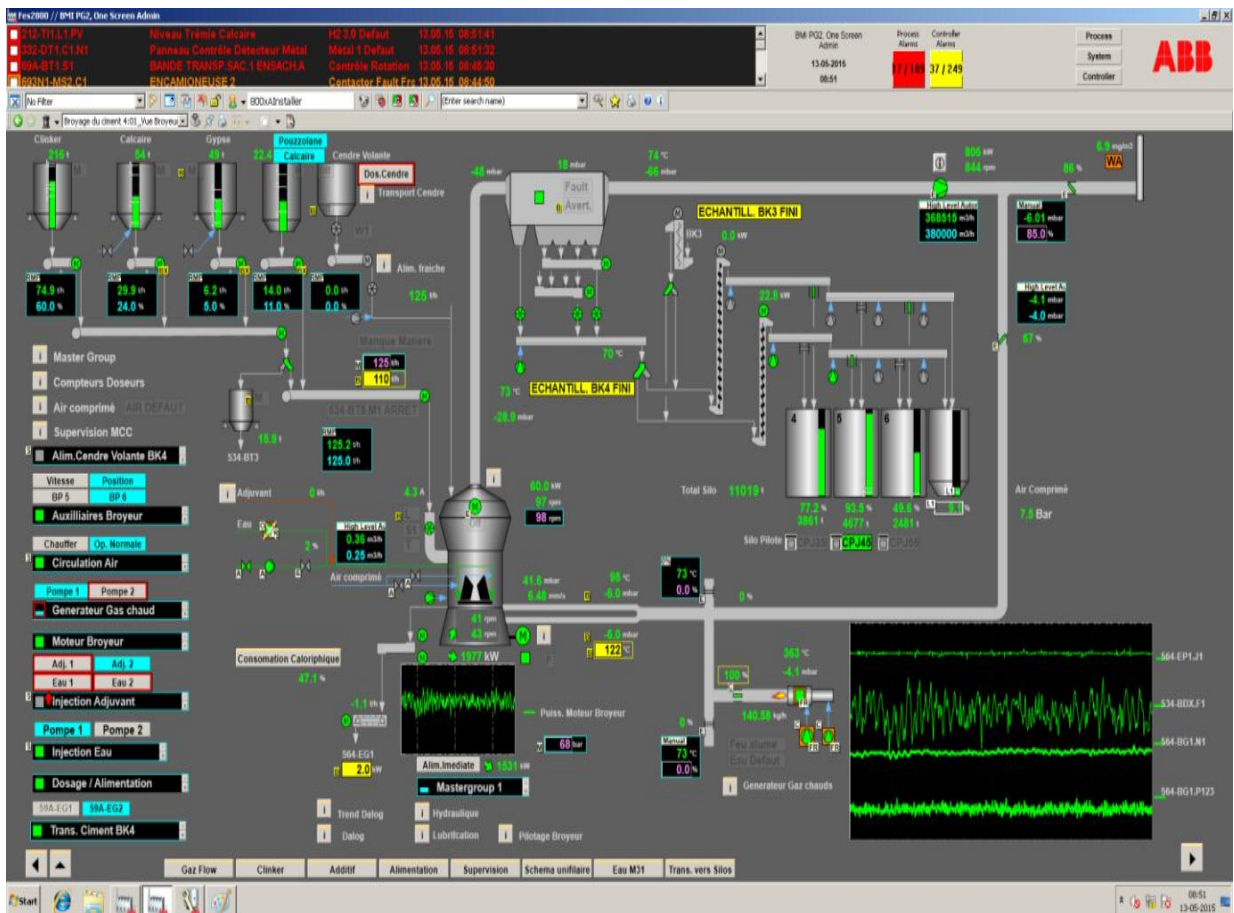


Figure 7: Flow sheet du broyeur ciment BK4

6. Ensachage et expédition du ciment

Le ciment produit est stocké dans des silos pour alimenter par la suite les ateliers d'ensachage pour les livraisons en sacs, ou les dispositifs de chargement et livraisons en vrac.

Pour les livraisons en sacs, le chargement des camions ou des wagons se fait par des chargeurs automatiques répondant aux normes environnementales. Les sacs sont en papier kraft ou du papier poreux permettant le seul passage de l'air. Les sacs en Kraft sont perforés pour permettre la sortie d'air lors de leur remplissage en ciment.

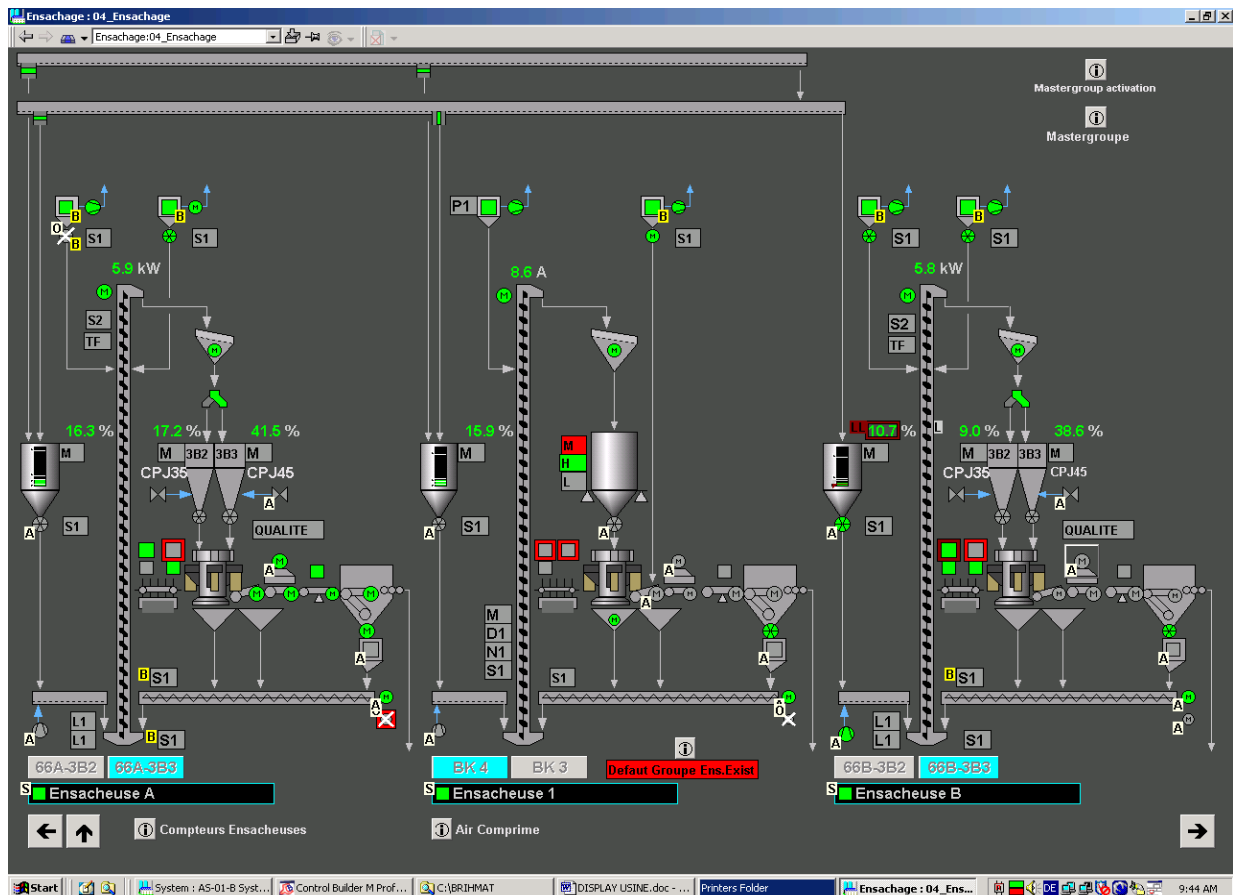


Figure 8 : Flow sheet ensachage et expédition

II. Les différentes qualités de ciment

Il existe plusieurs qualités du ciment qui sont régies par des normes internationales de qualité sur les liants hydrauliques. Suivant le pourcentage du clinker dans la composition finale du ciment, la résistance du ciment à la flexion et à la compression varie.

Chaque catégorie est destinée à un usage particulier :

➤ **Tableau 1 : les différentes qualités de ciment et leurs usages**

Produits	Description	Application
CPJ 35	C'est un ciment portland (ciment pur sans ajout, constitué de Clinker et de gypse) composé dont les constituants principaux sont le Clinker et le calcaire ; Il est constitué de 67% de clinker, 28% de calcaire et 5% de gypse. il est conforme à la norme NM 10.1.004. La classe De résistance entre 29.5 et 32 MPA	Maçonnerie
CPJ 45	C'est un ciment portland composé dont les constituants principaux sont le Clinker, le calcaire et le gypse; Sa composition est de 60 % en clinker, 11% en calcaire et 5% en gypse. il est conforme à la norme NM 10.1.004. La classe De résistance entre 39.5 et 42.	Production des bétons armés courants et des bétons destinés aux travaux de masse.
CPJ 55	C'est un ciment portland composé dont les constituants principaux sont le Clinker, le calcaire et le gypse Sa composition est de 76 % en clinker, 19% en calcaire et 5% en gypse. il est conforme à la norme NM 10.1.004. La classe De résistance de entre 50MPa et 52 MPA.	Travaux nécessitant une résistance élevée

Cahier des charges

La surconsommation énergétique menace directement la compétitivité-coût des industries les plus intensives en énergies électrique et thermique, celle dont les coûts énergétiques représentent une grande partie des coûts de production.

La réduction de la consommation énergétique représente donc une priorité majeure de l'industrie cimentière. C'est la raison pour laquelle notre encadrant de société Mr .**Kassaoui** nous a proposé le sujet qui consiste à optimiser la consommation énergétique du broyeur ciment BK4.

Afin de réduire cette consommation, notre travail consiste à faire :

- L'étude de la consommation électrique spécifique (CES) en traitant les facteurs influençant sur cette dernière à savoir :
 - L'humidité
 - La qualité de ciment
 - L'usure du broyeur
 - Les arrêts
- L'étude de la consommation calorifique spécifique en traitant l'influence des facteurs suivant :
 - L'humidité de la matière
 - Le procédé de combustion
- Des recommandations afin de réduire les pertes et d'améliorer l'efficacité énergétique

Pour mener à bien notre projet, nous avons procédé comme suit :

- Identification des équipements concernés (Chapitre 3)
- Surveillance et recueil des données (Chapitre4)
- Analyse des causes (Chapitre4)
- Recommandations (Chapitre4)

Chapitre III : Présentation du circuit de broyage

I. Introduction

Le broyeur à galet de type vertical est un équipement adéquat pour le broyage et le séchage des matériaux humides. Le broyage et le séchage peuvent être réalisés de manière très efficace avec une seule machine. Plusieurs matériaux peuvent être broyés dans les broyeurs verticaux à galets :

- Ciment
- Cru
- Charbon
- Pouzzolane

Le broyeur à galets de type vertical réalise 4 fonctions principales dans une seule machine :

- Le broyage
- Le séchage
- La séparation
- Le transport

II. Circuit de broyage

Le circuit de broyage est composé successivement des éléments principaux suivants :

- 1- Des trémies recevant les matières à broyer (clinker; gypse; calcaire et pouzzolane)
- 2-Des doseurs pour le dosage des proportions de matière qui vont composer le ciment spécifié (CPJ 35; CPJ45; CPJ55)
- 3-Un broyeur vertical pour le broyage des matières entrantes
- 4-Un filtre pour la récupération du ciment
- 5-Un ventilateur pour la génération d'air pour la circulation de la matière à l'intérieur du circuit du broyage.
- 6-Un générateur de gaz chaud pour le séchage des matières

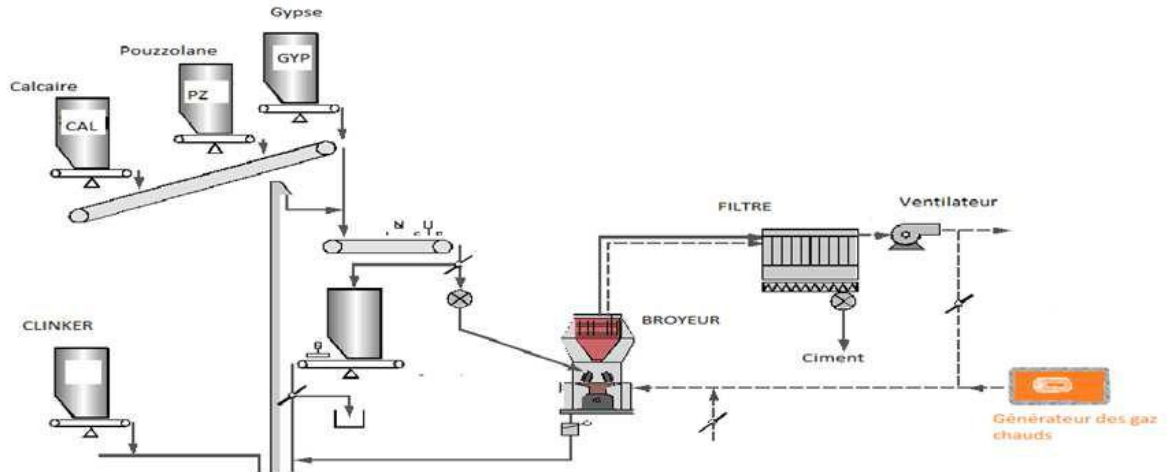


Figure 9 : Flow sheet du circuit de broyage de ciment

III. Présentation du broyeur BK4

1- Principe de fonctionnement du broyeur



Figure 10 : Broyeur vertical à galets Loesche

Les matières premières sont introduites dans le broyeur au moyen d'un sas ① et sont dirigées par la goulotte ② sur le centre de plateau du broyage ③. Des corps étrangers sont extraits par séparation magnétique en amont du sas ① et éliminés à travers une descente de déviation.

Sur le plateau de broyage, la matière à broyer se déplace vers le bord sous l'effet de la force centrifuge et parvient dans le centre et parvient dans la zone en rotation en dessous des meules de broyage ④. Les meules entraînées chacune dans un mouvement de rotation par le lit de matière ⑤ passant en dessous d'elle effectuent chacune en plus des oscillations dans un plan vertical. Ces oscillations produisent des déviations dans la tringlerie constituée par le levier oscillant ⑥ et les tiges et vérins des tendeurs à ressort hydropneumatiques ⑦. La force centrifuge produite par le plateau de broyage en rotation déplace la matière écrasée par les meules au-delà du bord extérieur du plateau. Le flux vertical du gaz chaud ⑨ introduit dans le compartiment de broyage à travers la couronne à aubes ⑧ entourant le plateau de broyage ③ saisit la matière écrasée constituée d'un mélange de particules plus ou moins fines et comportant notamment des particules de taille encore plus importante, et le transporte dans le séparateur ⑩.

Le séparateur ⑩ élimine les grosses particules à partir d'une taille déterminée par son réglage et les retourne en recirculation interne ⑪ sur le plateau de broyage ③, pour un nouveau passage sous les meules. Le produit fini est entraîné par le flux gazeux ⑫ en-dehors du broyeur.

Les corps étrangers et des proportions faibles de grosses particules tombent comme rejet à travers la couronne à aubes ⑧ dans le canal circulaire ⑬.

Les racleurs ⑭, solidaires du plateau de broyage en rotation transportent les corps étrangers dans la trémie de rejet ⑮.

Les matières premières entrant dans la production des ciments sont extraites des carrières avec des teneurs en humidité variables. Dès que la matière à broyer écrasée par les meules déborde du plateau de broyage au-dessus de la couronne à aubes ⑧, son contenu en humidité s'évapore spontanément au contact avec le flux de gaz chaud. Ainsi la température du mélange souhaitée à la sortie du broyeur de l'ordre 80 °C, est déjà atteinte dans le compartiment de broyage.

Le broyeur est entraîné par un moteur électrique ⑯ par l'intermédiaire d'un accouplement flexible ⑰ et d'un réducteur de broyeur avec arbre de sortie vertical ⑱.

2- Entraînement complet du broyeur

L'entraînement du broyeur Loesche se compose essentiellement des éléments suivants :

- Moteur du broyeur :
- **Tableau 2: Plaque signalétique du moteur broyeur :**

Puissance 2400 KW	Cos φ = 0.85
N = 992 tr/min	F = 50 Hz
U ₁ = 6000 V	I ₁ = 280 A
U ₂ = 1773 V	I ₂ = 825 A



Figure 11: Moteur du broyeur

- Réducteur du broyeur : Sert à entrainer un moulin à cylindres, pour réduire la vitesse de rotation du moteur électrique.
- **Tableau 3: Caractéristiques du réducteur :**

Puissance 2400 KW	Vitesse d'entrée 990 tr/min
Rapport 38.56	Vitesse de sortie 25.68 tr/min

- Accouplement entre le moteur du broyeur et le réducteur du broyeur.
- Protection d'accouplement : exclue tout contact involontaire avec les pièces en rotation lorsque le broyeur est en marche.

IV. Présentation du foyer sécheur

Le générateur de gaz chauds a pour but de sécher et déshydrater les ajouts que l'on utilise pour la fabrication du ciment ainsi une partie de la chaleur évacuée à la sortie du broyeur est réutilisée pour le séchage. Ce système de récupération contribue à l'amélioration du rendement thermique du broyage.

L'ensemble est composé d'une tête de combustion et d'un bruleur fuel :

- La tête de combustion comprend un directeur d'air cylindrique fixé par vis et un équipage central dont le choix permet de fixer le degré de rotation de l'air de combustion et d'adapter la forme de flamme à la géométrie du foyer.
- Le bruleur combine l'action de pulvérisation mécanique et celle d'un fluide auxiliaire (air comprimé, vapeur d'eau, gaz...) pour former une émulsion très fine et homogène.

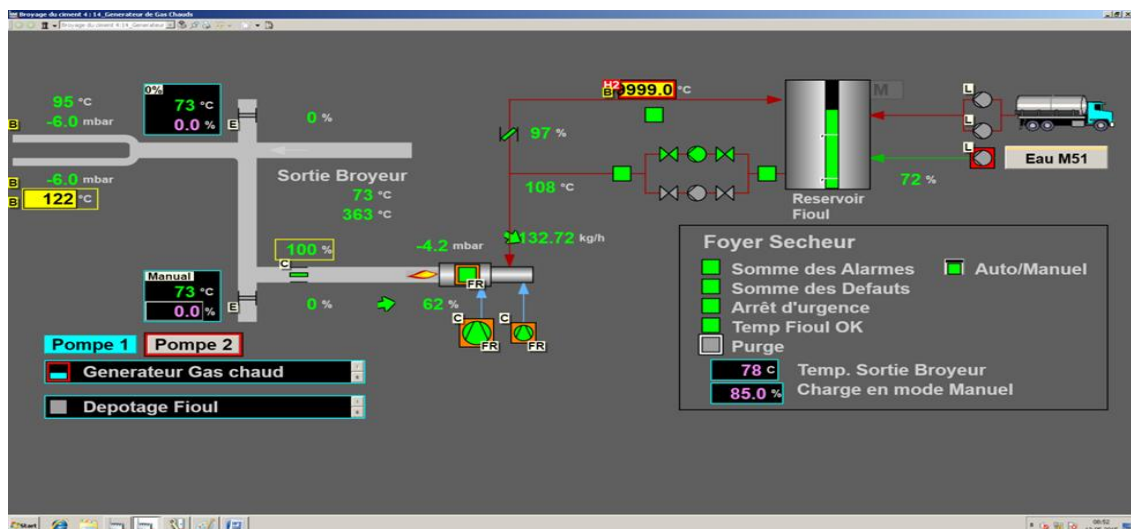


Figure 12 : Flow sheet du foyer sécheur

- Le brûleur fuel :
- Composants du brûleur à fuel :

1. Moteur.
2. Boîte de contrôle.
3. Formateur.
4. Electrodes.
5. Ventilateur.
6. Volute.
7. Déflecteur.
8. Gicleur.
9. Réchauffeur.
10. Cellule photosensible.
11. Electrovanne.
12. Pompe et régulateur de

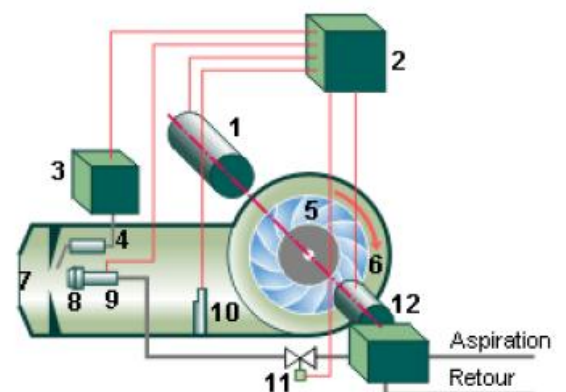


Figure 13 : Bruleur Fuel

✚ Principe de fonctionnement d'un bruleur Fuel :

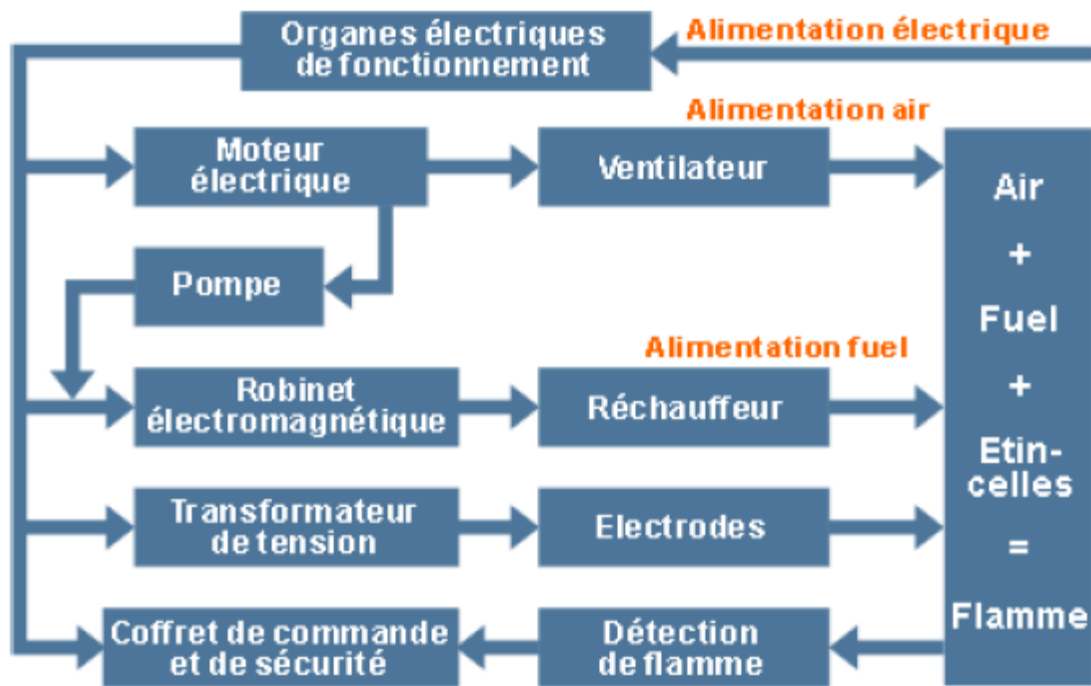


Figure 14 : Schéma représentant le principe de fonctionnement d'un bruleur Fuel

Conclusion

Nous pouvons remarquer d'après ce chapitre que l'atelier de broyage ciment consomme une quantité d'énergie considérable pour assurer le broyage et le séchage de la matière.

Pour cette raison, il est indispensable d'apporter attention à ces dépenses énergétiques en remontant aux causes qui entraînent une augmentation dans la consommation afin de la réduire et de réaliser un meilleur rendement et élargir la marge de bénéfices.

Dans le chapitre qui suit, nous ferons une étude complète sur la consommation énergétique spécifique au niveau du broyeur BK4 et finalement proposer des solutions efficaces qui permettront de réduire voire éliminer les pertes des énergies électrique et thermique.

Chapitre IV : Gestion énergétique du broyeur BK4

1. Introduction

L'industrie cimentière est grande consommatrice d'énergies thermique et électrique dont les coûts au niveau mondial fluctuent. Ces récentes années, les cimentiers ont fait d'importants efforts pour réduire cette consommation et alléger les coûts de production avec des équipements moins énergivores.

Ces fluctuations ont créé des contraintes qui doivent être maîtrisées pour satisfaire aux exigences de qualité et de productivité. Pour accroître la performance opérationnelle d'une cimenterie, dans les limites de ces contraintes changeantes, nous devons trouver le bouquet énergétique au meilleur prix, acheter l'énergie électrique au moment opportun et réduire ses consommations.

Afin d'assurer une bonne gestion, il est indispensable d'effectuer une étude complète et de remonter aux causes de la surconsommation énergétique pour trouver des solutions efficaces.

II. Ressources énergétiques :

1. Energie électrique :

L'usine est alimentée en énergie électrique par deux lignes haute tension de 60KV. L'énergie électrique haute tension (60 KV) est transformée en moyenne tension (5,5 KV) dans la salle électrique principale à l'aide de l'un des deux transformateurs de hautes tensions de 10 MVA de puissance. Cette salle alimente par la suite 9 salles électriques réparties dans l'usine par atelier de production (ces stations sont identifiées de P1 à P9). Ces salles comportent chacune, un transformateur de moyenne tension (5,5KV - 380V) éventuellement des disjoncteurs moyenne tension (5,5 KV), les modules électriques de différents équipements alimentés par la salle, des redresseurs pour l'alimentation des modules de contrôle. Par ailleurs, deux onduleurs alimentent le système de contrôle commande et la station de secours.

- Salle P1 : concassage
- Salle P2 : broyage cru et transport
- Salle P3 : homogénéisation et four
- Salle P4 : refroidisseur et manutention clinker
- Salle P5 : broyage charbon et fuel
- Salle P6 : salle d'éclairage d'usine
- Salle P7 : station de pompage
- Salle P8 : Broyeur BK3, et expédition
- **Salle P9 : Broyeur BK4.**

La distribution intérieure de l'usine utilise deux tensions différentes. La tension 5.5KV est utilisée pour l'alimentation des récepteurs de grande puissance et la tension 380V assure l'alimentation des récepteurs les moins puissants pour la commande et l'alimentation des cartes.

L'usine est équipée d'un groupe électrogène de 770 KVA pour alimenter les organes critiques tels que les onduleurs, le vireur du four, les ventilateurs V1 et V2 du refroidisseur.... et en cas de défaut d'alimentation dans une salle ou en cas de coupures électriques.

Dans ce chapitre nous nous limiterons d'étudier la consommation d'énergie électrique au niveau du broyeur BK4

⚡ Energie pneumatique (air comprimé) :

La production de l'air de service est assurée par une station composée de deux centrales d'air comprimé équipées des compresseurs de type **KAESER DSD 171**

Une première centrale pour satisfaire les besoins en air comprimé de l'ensemble des équipements de l'atelier de cuisson. Par ailleurs, cette centrale permet l'alimentation en air comprimé de l'atelier de broyage ciment en cas d'avaries sur la centrale d'air comprimé du broyeur ciment.

La deuxième centrale, équipée de trois compresseurs est réservée exclusivement à l'atelier de broyage et expéditions du ciment.

➤ **Tableau 4 : Plaque signalétique du Compresseur :**

Type	DSD 171
Puissance nominale	90 KW
Vitesse moteur nominale	1500 tr/min
Pression de service Max	8.5 bar
Température ambiante	+3°C / +46°C



Figure 15 : Compresseur KAESER DSD 171

2. Energie thermique :

La production de ciment consomme une grande quantité de matières premières non renouvelables (combustibles fossiles tel que le fioul lourd).

L'énergie utilisée par les équipements pour atteindre les températures requises très élevées, provient de ces combustibles.

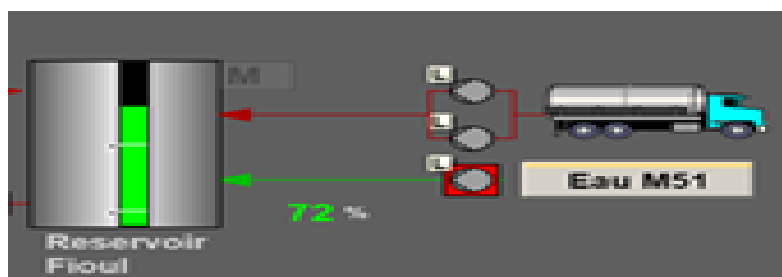


Figure 16 : Dépotage du Fioul

III. Etude de la consommation énergétique :

Afin de mener une étude complète, nous avons fait un suivi de la consommation énergétique pendant le mois Mars :

1. Suivi de la Consommation Electrique spécifique(CES) :

$$\text{CES} = \frac{\Sigma \text{Énergies électriques consommées (Moteur, ventilateur, Auxiliaires) (kWh)}}{\text{production journalière (t)}}$$

➤ Tableau 5 : CES du mois Mars avec relevé de production journalière

Dates	CES (kWh/t)			Total de CES (kWh/t)	Production en t
	Moteur BK4	Ventilateur	Auxiliaires		
01/03/2015	11.80	4.35	2.37	18,53	2067
02/03/2015	17.95	9.64	4.70	32.29	830
03/03/2015	33,1	8.15	3.73	31,15	1717
04/03/2015	17.56	13.02	3.24	33,83	2004
05/03/2015	17.32	8.32	3.35	29	1790
06/03/2015	19.54	8.80	3.13	31,47	1341
07/03/2015	17.01	7.74	3.11	27,85	2093
08/03/2015	17.47	7.68	2.63	27,78	2095
09/03/2015	16.05	7.69	2.83	26,57	2262
10/03/2015	15.71	7.56	3.09	26,35	1878
11/03/2015	16.59	7.57	3.14	27,30	2073
12/03/2015	16.67	7.69	2.65	27,01	2147
13/03/2015	17.70	7.65	2.78	28,13	2051
14/03/2015	16.25	7.42	3.02	26,7	2184
15/03/2015	17.72	7.45	3.25	28,41	2094
16/03/2015	16.11	7.39	3.09	26,40	2166
17/03/2015	17.89	8.24	3.53	29,66	1699
18/03/2015	17.12	7.88	3.11	28,11	2120
19/03/2015	20.25	8.23	3.53	32,01	1896
20/03/2015	19.32	8.08	3.40	30,79	1708
21/03/2015	20.22	8.17	3.27	31,66	1958
22/03/2015	18.98	7.91	3.87	30,75	1138
23/03/2015	20,00	7.84	4,22	32,05	1020
24/03/2015	21.15	8.71	3.84	33,7	1641
25/03/2015	21.68	8.65	5.25	35,56	821
26/03/2015	20.95	9,6	4,5	35,58	964
27/03/2015	19.70	8.66	4,6	32,73	1051
28/03/2015	18.3	8.08	6,1	30,06	1869
29/03/2015	20.86	8.46	3.26	33	1985
30/03/2015	19.47	8.51	4.68	32,66	940
31/03/2015	18.35	8.27	4.02	30,63	1270

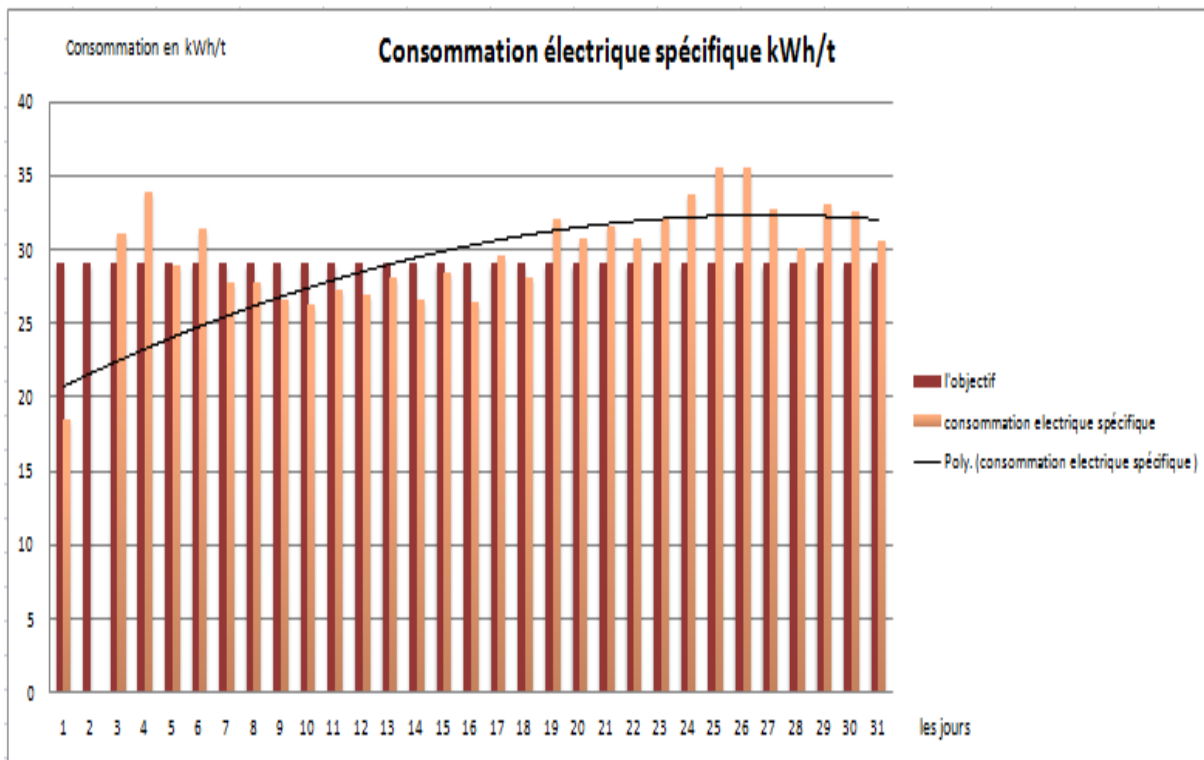


Figure 17 : Diagramme représentant les fluctuations de la consommation électrique spécifique du mois Mars

- **Interprétation de diagramme :**

Le diagramme représente les fluctuations de l'énergie électrique spécifique consommée durant le mois Mars en la comparant avec l'objectif visé c.-à-d. l'énergie qu'on est censé à ne pas dépasser pour éviter les pertes. Nous remarquons suite à la courbe de tendance qu'on a une tendance en hausse et donc la consommation de l'énergie électrique spécifique augmente et dépasse la cible qui est 29 kWh/t. Cela se traduit par des pertes considérables de l'énergie électrique.

2. Consommation calorifique spécifique broyage ciment

$$E_{\text{calorifique}} = \frac{\text{PCI} * T_{\text{Fuel}} * 4.185}{\text{Production}}$$

$E_{\text{Calorifique}}$ = Energie thermique consommée MJ/t

PCI = 9600 kcal /kg le pouvoir calorifique inferieur du fuel lourd

T_{fuel} = tonnage de fuel consommé

1 Cal = 4,185 J

➤ Tableau 6 : La consommation thermique du mois Mars avec relevé de production

Dates	M_{fuel} (t)	$E_{\text{calorifique}}$ (MJ/t)	Prod (t)
1 mars	4	77,75	2067
2mars	2	96,76	830
3mars	4	93,59	1717
4mars	4	80,19	2004
5mars	3	67,35	1790
6mars	2	59,9	1341
7mars	5,09	97,69	2093
8mars	4	76,73	2095
9mars	4	71,73	2262
10mars	4	85,55	1878
11mars	2	38,76	2073
12mars	4	74,86	2147
13mars	4	78,37	2051
14mars	4	73,59	2184
15mars	4	76,73	2094
16mars	4,39	81,43	2166
17mars	4	94,6	1699
18mars	2	37,89	2120
19mars	2	42,37	1896
20mars	3	70,58	1708
21mars	4	82,08	1958
22mars	2	70,6	1138
23mars	2	78,76	1020
24-mars	4	97,93	1641
25mars	2	97,91	821
26mars	1,23	51,1	964
27mars	2	76,48	1051
28mars	3	64,49	1869
29mars	4	80,95	1985
30mars	2	85,47	940
31mars	3	94,92	1270
Mensuel	$\sum T_{\text{fuel}}$ 98,70	Moy E_{cal} 75, 21	\sum Prod 5272

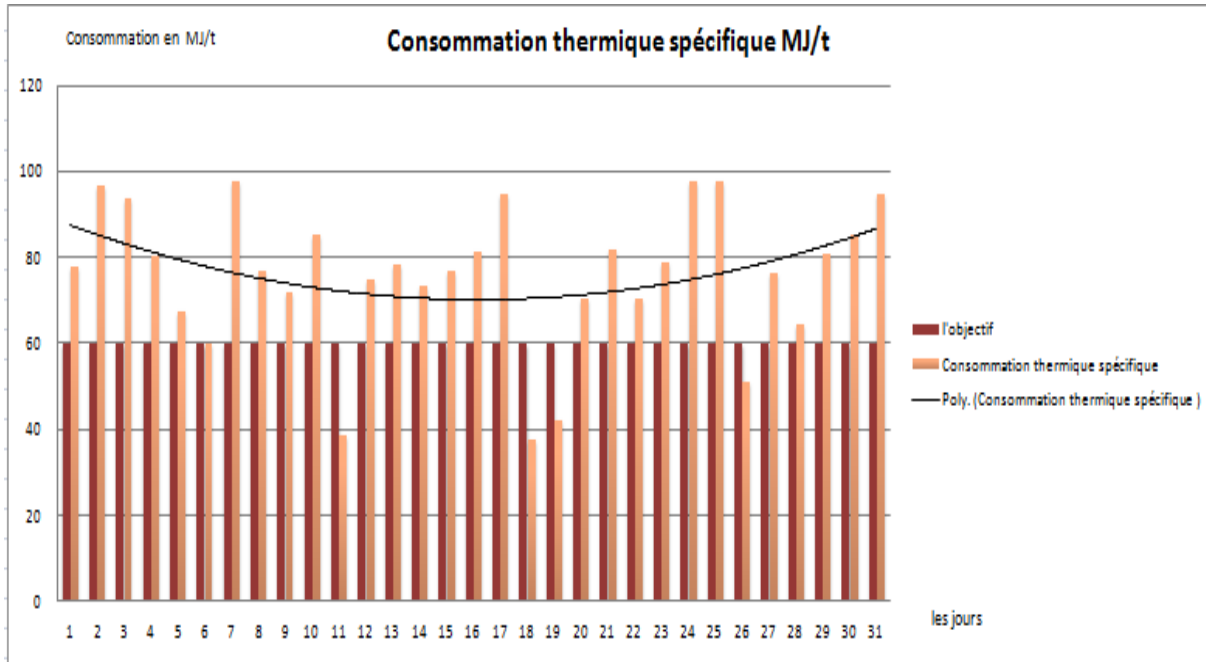


Figure18 : Diagramme représentant les fluctuations de la consommation calorifique

- **Interprétation de diagramme :**

Le diagramme représente les fluctuations de la consommation calorifique spécifique par rapport à l'objectif visé, et donc nous pouvons bien remarquer suite à la courbe de tendance qu'au début du mois, la consommation était élevée puis elle diminue pour se redresser entre le 8 et 24 Mars et elle commence à augmenter après le jour 25. Donc ces fluctuations engendrent des pertes de l'énergie thermique et on peut bien le vérifier par la différence entre la moyenne de l'énergie thermique spécifique consommée qui est 75.21MJ/t et la cible 60 MJ/t , donc la différence est de l'ordre de 25% , un chiffre à ne pas négliger.

Après l'analyse des deux diagrammes et suite à une comparaison entre les deux, nous remarquons que lorsque l'énergie thermique spécifique augmente, la CES diminue et vice versa, mais ça n'empêche qu'elles peuvent être élevées en même temps comme nous le remarquons à la fin du mois, et ce est du à plusieurs facteurs à savoir : l'humidité de la matière, la qualité de ciment, les arrêts...

IV. Causes de la surconsommation énergétique

1. Diagramme d'Ishikawa

D'après le suivi de la consommation des énergies électrique et thermique nous pouvons remarquer que ces dernières se caractérisent par des fortes fluctuations. De ce fait il est inéluctable de remonter aux causes grâce à un diagramme d'Ishikawa qui illustre une représentation bien structurée de l'ensemble des causes qui entraînent une surconsommation.

Le schéma comprend des facteurs causaux identifiés et catégorisés selon la règle des 5M : Matériel, matière, Milieu, Méthode et main d'œuvre.

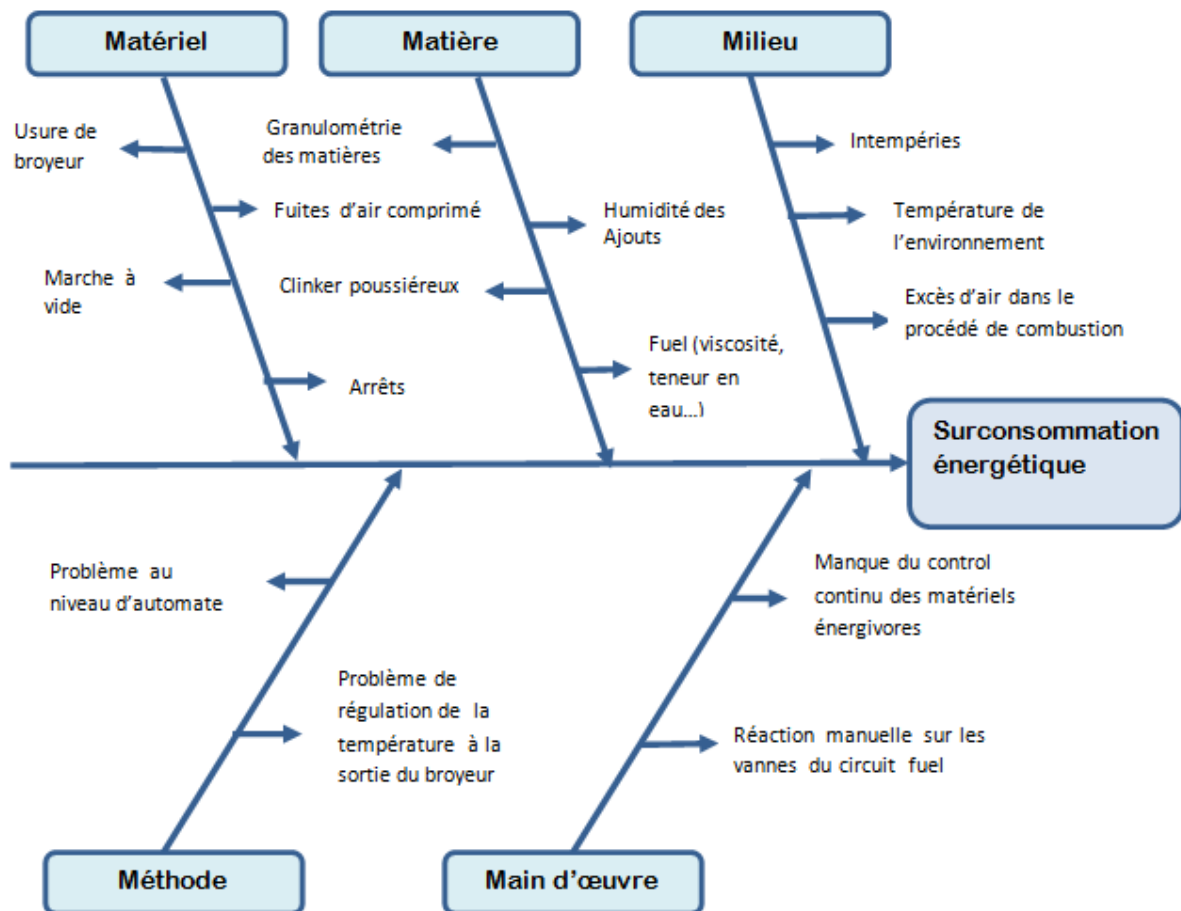


Figure 19 : Diagramme cause-effets pour la surconsommation énergétique

NB : Les paramètres ci-dessous sont valables pour tous les mois

2. Analyse des causes

Le diagramme d'Ishikawa nous a donné une vision détaillée de l'ensemble des causes de la surconsommation énergétique en les regroupant suivant 5 catégories.

Afin de mener une étude efficace, nous avons choisi de l'ensemble des causes exprimés sur le diagramme causes-effet, les causes principales qui influencent le plus la consommation énergétique en les regroupant selon 2 catégories :

- Causes Influençant sur la consommation d'énergie électrique
- Causes influençant sur la consommation d'énergie thermique

➤ **Tableau 7 : tableau représentant les causes qui influencent sur la CES et la consommation d'énergie thermique spécifique**

	Energie Electrique	Energie Thermique
L'humidité des ajouts	✓	✓
Qualité de ciment (Granulométrie de la matière)	✓	
Usure du broyeur	✓	
Les arrêts	✓	✓
Les fuites d'air comprimé	✓	
La combustion		✓

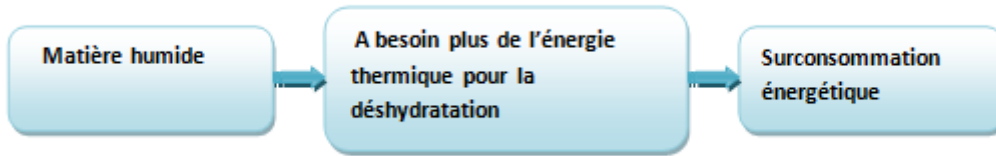
a- L'humidité :

L'humidité est la présence d'eau ou de vapeur d'eau dans l'air ou dans une substance.

Quand la matière est humide, elle devient de plus en plus difficile à broyer que lorsqu'elle est sèche et par conséquent elle exige plus d'énergie électrique.

Quand le clinker utilisé sort directement du four, il est à une température relativement élevée par rapport aux autres composants, cette variation de température entraine l'humidité de la farine.

- Influence Directe :



- Influence Indirecte :



b- La qualité de ciment

La finesse du produit fini diffère selon la qualité du produit, chaque qualité exige une finesse bien déterminée.

Quand la taille des particules est plus grande, elles nécessitent plus d'efforts pour le broyage et donc on doit fournir des KWH de plus.



c- Usure du broyeur

L'usure désigne la dégradation d'un matériau sous l'effet de sollicitations répétées ou prolongées.

Cette déchéance se manifeste au niveau des organes les plus importants dans le processus du broyage tels que les galets et la piste rotative.

Plusieurs causes engendrent la dégradation du broyeur à savoir :

- **Choc thermique** : Les galets sont soumis à des variations de température plus ou moins brusques au niveau de la couche externe ce qui provoque des contraintes de compression à la surface, et de traction au cœur du matériau.

- **Les corps étrangers** : la matière contient, tout au long du processus, des corps étrangers qui ne font pas partie de la composition du ciment, dans la plupart des cas ce sont des corps métalliques, ainsi on trouve des rochers du ciment solidifiés et plaqués contre la piste.
- **L'injection d'eau** : Il sert à stabiliser le lit de la matière sur le plateau de broyage. Pourtant la quantité de l'eau injectée doit être très faible pour qu'elle n'influence pas les conditions thermiques du broyeur. Cette eau présente aussi un facteur de dégradation, des chemises, des galets et du blindage de la table si elle entre en contact direct avec ces éléments.

L'usure de ces composants (galets, piste) influence directement sur le débit spécifique et la consommation électrique spécifique du broyeur :

$$\text{Débit spécifique (t/h)} = \frac{\text{Production (t)}}{\text{Heures de marche (h)}}$$

$$\text{Consommation électrique spécifique (kWh/t)} = \frac{\text{Energie (kWh)}}{\text{Production (t)}}$$

Pratiquement l'impact de l'usure du broyeur s'exprime par l'élargissement de la distance qui sépare les galets et la piste rotative, ce qui entraîne une augmentation de la quantité de matière à broyer qui déborde de l'anneau, et par la suite une diminution de débit du broyeur et par conséquent une augmentation de l'énergie électrique spécifique consommée.



d- Les arrêts

Il existe 3 types d'arrêts :

- Arrêt d'optimisation :

L'équipe Holcim exige un arrêt d'optimisation pendant les heures de pointes. Le processus de fabrication se trouvera donc arrêté lors des heures où la consommation d'énergie coûte cher.

La tarification coûte :

- Très chère durant les heures de super pointes
- Chère durant les heures de pointes
- Moins chère durant les heures pleines
- Bon marché durant les heures creuses

➤ **Tableau 8 : les tranches horaires et le prix du kWh dans chaque tranche**

Heures super pointes	19h – 21h	1,49 DRH/KWH
Heures de pointes	18h – 19h 21h – 23h	0,9 DRH/KWH
Heures creuses	23h – 07h	0.73 DRH/KWH
Heures pleines	07h – 18h	0.66 DRH/KWH

- Arrêt programmé :

L'arrêt programmé est un arrêt que l'équipe décide d'exécuter afin de réparer ou d'assurer le bon fonctionnement d'un équipement.

Ce type d'arrêt ne cause pas de pertes d'énergie car il est bien planifié à l'avance.

- Arrêt imprévu :

L'un des plus grands soucis que peut affronter une société, les arrêts imprévus des équipements qui inévitablement engendrent une grande perte d'énergie au sein de l'usine. L'équipe Holcim fait un suivi journalier des arrêts au niveau du broyeur ciment en déterminant les différents arrêts tout en calculant leurs durées et leurs fréquences.

Nous trouverons ci-dessous une analyse Pareto des arrêts qui ont eu lieu pendant les mois Janvier, Février, Mars, Avril et Mai.

❖ **Le diagramme Pareto**

Le diagramme Pareto permet de hiérarchiser les problèmes en fonction du nombre d'occurrences et ainsi définir des priorités dans le traitement des problèmes.

Cet outil est basé sur la loi des 20/80, autrement dit cet outil met en évidence les 20% de causes sur lesquelles il faut agir pour résoudre 80% du problème. Il sera utile pour déterminer sur quels leviers on doit agir en priorité pour améliorer de façon significative la situation.

✚ **Analyse Multicritère**

Le vote pondéré est un outil d'évaluation multicritère, il nous permet de classer les différents critères selon un ordre d'importance lors d'une réunion avec le groupe de travail. Suite à ce vote pondéré nous avons utilisé dans notre analyse une pondération égale à 5 pour le critère de la fréquence d'arrêts et 3 pour le temps d'arrêt.

➤ **Tableau 9 : Matrice multicritère**

Equipement	Temps d'arrêt Ta (h)	Ta*Pondération	Nombre d'arrêts Na	Na*Pondération	$S=Ta*P_{Ta}+Na*P_{Na}$
Moteur	11,34	34,02	13	65	99,02
Filtre process	2,94	8,82	12	60	68,82
Bande BT2	0,15	0,45	3	15	15,45
Pompe hyd	1,91	5,73	4	20	25,73
By pass	1,54	4,62	2	10	14,62
Chaîne refus	2,49	7,47	7	35	42,47
Bande BT1	1	3	6	30	33
Foyer sécheur	3,45	10,35	5	25	35,35
Moteur (démarreur a liquide)	0,28	0,84	3	15	15,84
Sas	0,6	1,8	2	10	11,8
Broyeur (vérin)	0,22	0,66	3	15	15,66
Moteur (microcoupure)	6,8	20,4	4	20	40,4
Elévateur ciment	5,25	15,75	4	20	35,75
Séparateur	0,1	0,3	1	5	5,3
bande BT 5	0,45	1,35	1	5	6,35
					$\Sigma S = 465.56$

 Analyse Pareto

Le pourcentage des arrêts est calculé grâce à la relation suivante :

$$\% \text{ (chaque équipement)} = \frac{Ta * P_{Ta} + Na * P_{Na}}{\sum (Ta * P_{Ta} + Na * P_{Na})}$$

Ta : Temps d'arrêt(h)

P_{Ta} : Pondération = 3

Na : Nombre d'arrêt

P_{Na} : Pondération = 5

➤ **Tableau 10 : Le tableau récapitulatif des données qui permet de préparer la construction du diagramme Pareto des arrêts du broyeur BK4**

Équipement	% d'arrêts	% cumulé
Moteur	21,27	21,27
Filtre process	14,78	36,05
Foyer sécheur	9,12	45,17
Bande BT2	8,68	53,85
Sas	7,68	61,53
Pompe hyd	7,59	69,12
Bande BT1	7,09	76,21
Elevateur ciment	5,53	81,74
By pass	3,40	85,14
Broyeur (verin)	3,36	88,50
Moteur (microcoupure)	3,32	91,82
Chaine refus	3,14	94,96
Moteur (demareur a liquide)	2,53	97,50
Separateur	1,36	98,86
bande BT 5	1,14	100,00

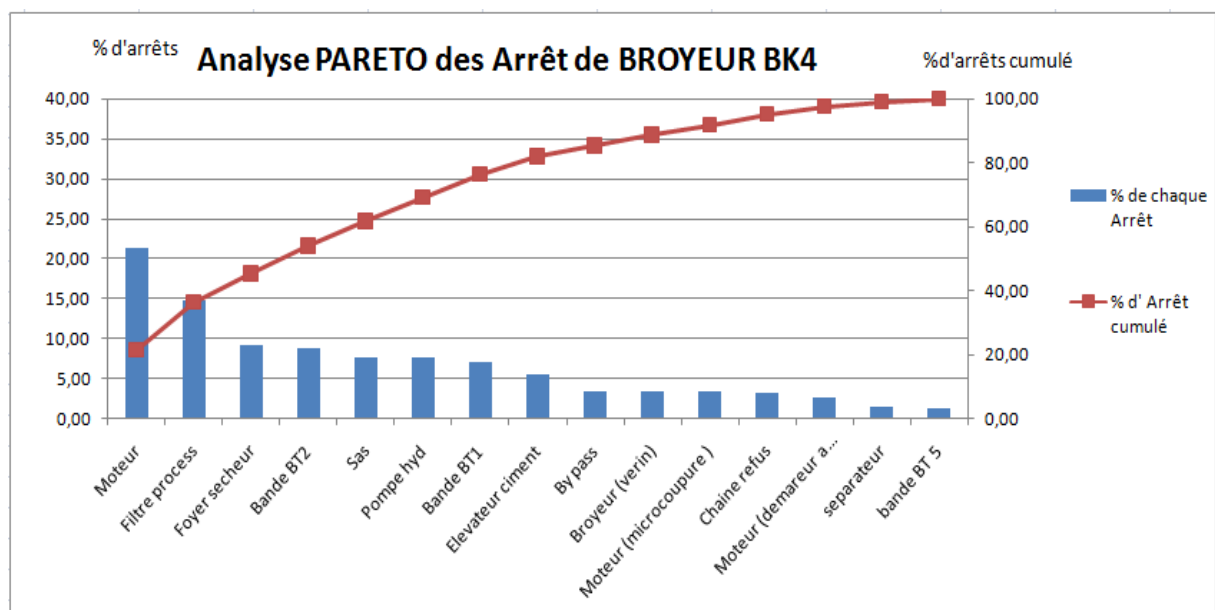


Figure 20: Diagramme Pareto des arrêts du Broyeur BK4

Interprétation du diagramme :

Nous remarquons d'après le diagramme Pareto que les arrêts au niveau du moteur représentent 21.27% de la totalité des arrêts. Or le moteur est considéré comme l'un des grands consommateurs d'énergie électrique, et donc toute défaillance au niveau du moteur peut engendrer des pertes considérables d'énergie. Ainsi d'autres arrêts qui ont eu lieu au niveau des autres équipements tel que le filtre process avec un pourcentage de 14,78% et le foyer sécheur avec un pourcentage de 9,12%. Nous remarquons aussi des arrêts au niveau des autres équipements avec des pourcentages négligeables par rapport à ceux cités, mais qui doivent aussi être pris en compte lors de l'élaboration du plan d'action.

f- Les fuites d'air comprimé :

Les fuites d'air comprimé sont invisibles. Elles n'ont ni couleur, ni odeur. Le sifflement de l'air qui fuit se confond aux bruits ambiants des machines et de l'outillage pneumatique.

Les fuites ne peuvent pas être complètement supprimées dans un réseau industriel d'air comprimé et représentent souvent une part non négligeable du surplus de consommation énergétique.

Ces fuites d'air comprimé empêche le fonctionnement normal des compresseurs c.-à-d. les compresseurs n'oscillent plus entre les modes de fonctionnement en charge et à vide. Pour compenser ces pertes d'air comprimé dus aux fuites, les compresseurs est en charge de façon continue, ce qui engendre des pertes énergétiques considérables.



g- La combustion du Fuel :

Les pertes dans un procédé de combustion dépendent de :

- Du mélange d'air : (L'excès d'air)

L'excès d'air peut résulter soit d'un réglage du volet d'air au niveau du brûleur, soit d'une impossibilité à régler l'arrivée d'air.

L'air en excès implique :

- une augmentation des pertes
- une diminution du rendement

Ainsi cette augmentation entraînera un accroissement des dépenses énergétiques

- la composition du combustible :

Une part d'eau importante dans le Fioul supprime de l'énergie à la combustion et abaisse le pouvoir calorifique. Dans le cas le plus défavorable, cette eau peut provoquer la formation de bulles de vapeur dans le brûleur et rendre la combustion instable.

Les fiouls lourds peuvent être utilisés en tant que combustibles. Brûler ces combustibles en émulsion avec l'eau permet de diminuer la longueur de flamme par rapport au combustible pur.

V. Recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique

1. Solutions pour réduire les pertes énergétiques analysées précédemment

Les sources de surconsommation étudiées engendrent d'importantes pertes énergétiques qui se traduisent par des dépenses considérables d'argent, pour cela il est indispensable de chercher les moyens les plus efficaces afin de remédier à cette problématique et d'assurer la réduction des coûts de production.

De nombreuses solutions peuvent réduire de façon significative les consommations calorifique et électrique d'une cimenterie. Chaque solution envisagée est à valider sur le plan technico-économique avec les ingénieurs spécialisés dans l'ensemble des aspects énergétiques, production, qualité et impact sur l'environnement.

a- l'humidité

Afin de diminuer le taux d'humidité des matières premières utilisées, il est conseillé qu'elles soient stockées à l'abri des intempéries.

Il est préférable aussi que le clinker utilisé représentant la matière principale du ciment provienne directement du four vers le broyeur ciment et qu'il ne soit pas stocké pour de longues périodes, et en cas de stockage il est nécessaire qu'il soit stocké dans un hall couvert.

b- La granulométrie de la matière :

+ L'ajout des agents de mouture

Les agents de mouture agissent sur les surfaces créées lors de la fracturation des particules. Ces surfaces sont chargées électriquement, ce qui engendre l'attraction mutuelle des petites particules et donc leur ré-agglomération en formant des amas.



Figure 21: Agents de mouture

Les agents de mouture sont généralement utilisés à faible dosage, entre 0,02 % et 0,05 % de la masse du clinker. Ces derniers sont obtenus à partir de bases chimiques (poly carboxylates-polyacrylates). Ces agents de mouture répondent aux trois besoins fondamentaux des cimentiers, à savoir : l'efficacité du broyage, l'amélioration des performances mécaniques ainsi que des réponses aux problématiques techniques spécifiques. Ils sont introduits soit à l'entrée du broyeur soit directement à l'intérieur. Ils sont constitués de substances polarisables, fixées par adsorption à la surface des particules. Ceci atténue l'effet des charges de surface en réduisant leur ré-agglomération. Les agents de mouture augmentent ainsi l'efficacité du broyage et de la séparation, ce qui permet un gain de productivité.

La fraction des particules broyées diminue et la répartition granulométrique est plus favorable à un ciment de meilleure qualité. Les agents de mouture permettent donc aux cimentiers d'obtenir la finesse et la qualité de ciment recherchées.

Avantages obtenus:

- ✓ Augmentation de débit de production.
- ✓ Réduction de consommation électrique spécifique.
- ✓ Amélioration de la qualité de ciment par une distribution granulométrique plus favorable.

c- L'usure du broyeur :

Afin de réduire les pertes d'énergie électrique dues à l'usure du broyeur, il est incontournable de chercher des solutions qui vise à prolonger la durée de vie des galets, réduire la vitesse de l'usure par rapport au temps et minimiser les coûts de la maintenance.

Dans ce cadre nos recommandations se résument comme suit:

- ✓ Veiller à ce que de l'eau n'entre pas en contact directe avec les galets et la table lors du fonctionnement du broyeur et qu'il est orienté vers le lit de matière.
- ✓ Prévoir un système plus efficace pour la détection des pièces métalliques en amont du broyeur.
- ✓ Enlever régulièrement les couches de ciment formées sur la plaque de broyage avant qu'elles n'atteignent des volumes importants.

d- Les arrêts

✚ Optimisation de l'énergie grâce aux arrêts d'optimisation

L'énergie consommée durant les tranches horaires de super pointes coutent 3 fois plus que celle consommée durant les heures creuses (D'après le tableau). Cette tarification incite l'équipe à limiter ses consommations durant les périodes où l'électricité coûte plus chère.

Donc l'arrêt du processus de fabrication durant les heures de pointes et de super pointes représente une optimisation de l'énergie électrique, en revanche le processus de fabrication reprendra marche durant les heures pleines et les heures creuses.

✚ Optimisation de l'énergie par minimisation des arrêts imprévus

Afin de réduire les pertes d'énergie et d'améliorer l'efficacité énergétique, il est inéluctable de minimiser les pannes et les arrêts imprévus.

Dans l'axe qui précède (analyse des causes), nous avons présenté les différents arrêts qui ont eu lieu durant les mois Janvier, Février, Mars, Avril et Mai. Et après avoir fait une analyse Pareto, il était nécessaire de chercher les causes d'arrêts et d'effectuer un plan d'action.

Le tableau ci-dessous représente le plan d'action élaboré pour remédier aux anomalies déterminées précédemment.

➤ **Tableau 11: Plan d'actions pour les arrêts déterminés durant les mois Janvier Février, Mars, Avril et Mai**

Causes d'arrêts	Poste responsable	Description	Action
Vibration Moteur	Production/M. électrique	Vibration	amélioration du procès (période hivernale) + améliorer les performances du foyer sécheur
Filtre Procès	M. électrique / M. mécanique	Bourrage	Améliorer la qualité d'air (installer un ballon d'air près du filtre procès)
Foyer sécheur	Production	Excès du débit de fuel	Entretien systématique de l'automate
Bande BT2	M. électrique	Contrôle de rotation	Entretien systématique de la sécurité
SAS	Production /M. électrique	Coincement	entretien des palles sas et régler la granulométrie de la matière
Elévateur	M. mécanique	Deport bande	centrage bande élévateur
By pass	Production	Coincement	entretien by pass chaque arrêt par optimisation (nettoyage-purge circuit d'air)

e- Fuites d'air comprimé :

Avant de penser aux économies à réaliser sur l'installation d'air comprimé elle-même pour en augmenter le rendement et réduire les frais d'énergie, mieux vaut penser d'abord à supprimer le terrible gaspillage généré par les fuites. Donc il est primordial de détecter et supprimer les fuites sur le circuit de distribution d'air comprimé. Le taux de fuite sur les circuits de distribution est en moyenne de 20 à 25 %. Les fuites peuvent représenter entre 40 et 50% de la consommation électrique du compresseur. La suppression de ces fuites est donc une source importante d'économies d'énergie.

Il existe plusieurs méthodes de détection des fuites :

- recherche d'un bruit audible provoqué par des grosses fuites.
- application d'eau savonneuse avec un pinceau sur les zones suspectes.
- utilisation de détecteurs aux ultrasons.
- détection des fuites au moyen de gaz traceurs, en utilisant par exemple de l'hydrogène ou de l'hélium.

f- La combustion :

Optimiser le procédé de combustion vise à une :

-Augmentation du rendement de combustion

Afin d'assurer une combustion optimale du Fuel tout en réduisant les pertes énergétiques nous avons proposé :

L'installation d'un préchauffeur d'air

Le préchauffeur d'air réchauffe l'air qui alimente le bruleur, une température d'air plus élevée améliore la combustion, en général l'air est souvent de 10 à 20 °C plus chaud par rapport à la température extérieure. Il est ainsi possible de compenser en partie les pertes d'efficacité.

La régulation de l'excès d'air

Dans la pratique les bruleurs ne mélangent pas le combustible et l'air de façon parfaite, même dans les meilleures conditions possibles. De plus un mélange complet peut demander beaucoup de temps, donc pour obtenir une combustion complète et réduire la perte de chaleur, l'excès d'air doit être maintenu dans des limites appropriées.

Afin de réduire les effets néfastes de la combustion, les opérateurs procédaient d'habitude à des ajustements successifs de l'excès d'air avec la charge.

Malgré la vigilance des opérateurs, cette façon de faire ne promettait pas d'optimiser les réglages

Pour remédier à ce problème, nous avons intérêt à installer des analyseurs d'oxygène ce qui permet d'améliorer davantage le suivi de la combustion.

Avantage :

- ✓ Obtenir des économies importantes de combustible

2. Optimisation de la consommation électrique spécifique en utilisant la méthode simplexe

Le but est de minimiser le coût d'énergie électrique en répartissant de façon optimal les tranches horaires selon chaque qualité de ciment sachant que la consommation électrique diffère d'une qualité à une autre et que chaque tranche horaire a un prix différent .

- Le coût se calcule par la formule suivante :

$$\text{Coût d'énergie électrique} = \frac{\sum_{\text{Qualité}} (\sum_{\text{Tranche Horaire}} (H_{Th} * \text{Cout}_{Th})) * C. \text{Electrique}_{\text{Qualité}}}{\text{Production}}$$

H_{Th} = durée de marche de chaque tranche horaire

❖ Modélisation du programme :

Les variables :

- X1 : nombre d'heures pleines nécessaire par mois pour fabriquer le CPJ 35.
- X2 : nombre d'heures creuses nécessaire par mois pour fabriquer le CPJ 35.
- X3 : nombre d'heures de pointes nécessaire par mois pour fabriquer le CPJ 35.
- X4 : nombre d'heures de super pointes nécessaire par mois pour fabriquer le CPJ 35.
- Y1 : nombre d'heures pleines nécessaire par mois pour fabriquer le CPJ45.
- Y2 : nombre d'heures creuses nécessaire par mois pour fabriquer le CPJ 45
- Y3 : nombre d'heures de pointes nécessaire par mois pour fabriquer le CPJ 45
- Y4 : nombre d'heures de super pointes nécessaire par mois pour fabriquer le CPJ 45
- Z1 : nombre d'heures c pleines nécessaires par mois pour fabriquer le CPJ 55.
- Z2 : nombre d'heures creuses nécessaire par mois pour fabriquer le CPJ 55.
- Z3 : nombre d'heures de pointes nécessaire par mois pour fabriquer le CPJ 55.
- Z4 : nombre d'heures de super pointes nécessaire par mois pour fabriquer le CPJ 55.

❖ Les Contraintes :

- $X1+X2+X3+ X4 \leq$ les heures de marche réelle de CPJ 35
- $Y1+Y2+Y3+ Y4 \leq$ les heures de marche réelle de CPJ 45
- $Z1+Z2+Z3+ Z4 \leq$ les heures de marche réelle de CPJ 55
- $X1 + Y1 +Z1 \leq$ le temps disponible des heures pleines
- $X2 + Y2+Z2 \leq$ le temps disponible des heures creuses
- $X3 + Y3 +Z3 \leq$ le temps disponible des heures pointes
- $X4+ Y4 +Z4 \leq$ le temps disponible des heures super pointes

Application du modèle au mois Mars :

La durée de la totalité des arrêts programmés intervenus au mois Mars est de 298 h.
 La durée de la totalité des arrêts non programmés intervenus au mois Mars est de 4.6h
 D'où la répartition mensuelle en éliminant les durées d'arrêts est la suivante :

- 146 pour les heures pleines
- 202.3h pour les heures creuses
- 56.4 h pour les heures de pointe
- 36.7h pour les heures de super pointe

Le temps en marche réel et les kW consommés selon chaque qualité de ciment sont :

➤ **Tableau 12 : Répartition des heures de marche réelle et des kW consommés selon chaque qualité**

Qualité	Le temps en marche réel (h)	Les kW consommés(kW)
Cpj 35	61.8	91.9
Cpj 45	309	924.7
Cpj 55	70.6	402.4

❖ **Fonction Objectif :**

$$\text{MIN } [67 X1 + 60.6 X2 + 82.7 X3 + 136.9 X4] + [675,03 Y1 + 1610,3 Y2 + 832.2 Y3 + 1377.8Y4] + [293.7 Z1 + 265.5 Z2 + 362.16 Z3 + 599.5 Z4]$$

❖ **Les Contraintes :**

$$\begin{aligned} X1+X2+X3+ X4 &\leq 61.8 \\ Y1+Y2+Y3+ Y4 &\leq 309 \\ Z1+Z2+Z3+ Z4 &\leq 70.6 \\ X1 + Y1 + Z1 &\leq 146 \\ X2 + Y2 + Z2 &\leq 202.3 \\ X3 + Y3 + Z3 &\leq 56.4 \\ X4+ Y4 + Z4 &\leq 36.7 \end{aligned}$$

❖ **la solution avec Excel :**

X1 = 61.8	Y1 = 13.6	Z1 = 70.6
X2 = 0	Y3 = 202	Z2 = 0
X3 = 0	Y3 = 56.4	Z3 = 0
X4 = 0	Y4 = 36.7	Z4 = 0

❖ Résolution du programme dans Excel

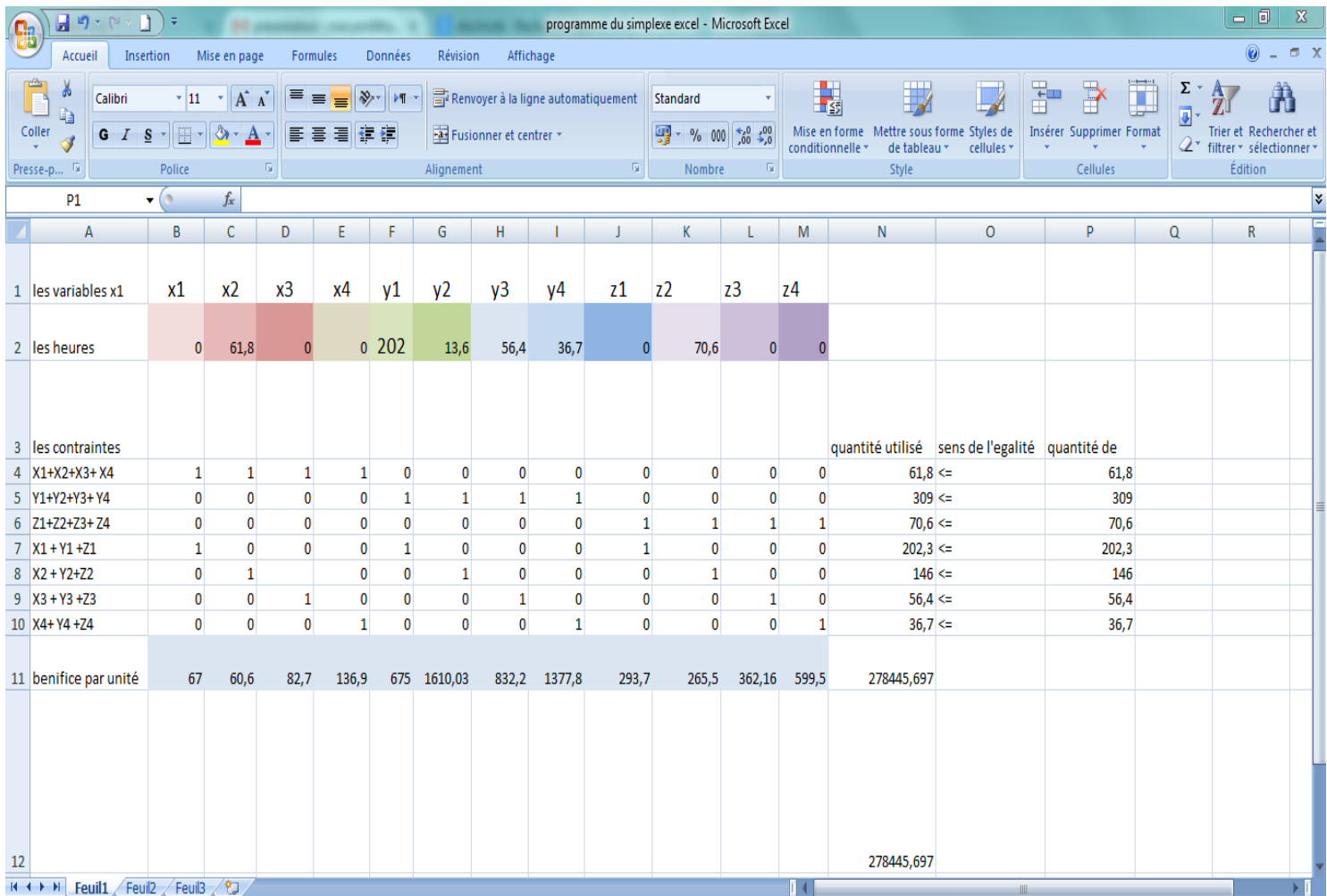


Figure 22 : Résolution du programme dans l'Excel

❖ Résultats obtenus

	CPJ 35	CPJ 45	CPJ55
Heure Pleines	61.8	13.6	70.6
Heure Creuses	0	202	0
Heure Pointes	0	56.4	0
Heure Super Pointes	0	36.7	0

❖ Interprétation

Les résultats obtenus sont adéquats au problème. Cette application était pour le mois de mars mais ça n'empêche que le programme que nous avons proposé soit exploité pour optimiser la CES des autres mois.

Conclusion

Dans le cadre de notre projet de fin d'étude, l'enjeu crucial que représente la consommation énergétique dans l'industrie cimentière, nous a amené à faire un suivi de la consommation d'énergies électrique et thermique au niveau du broyeur BK4, à analyser les données, et à présenter les principales causes de la surconsommation.

Dans notre stage technique «Optimisation de la consommation énergétique du broyeur BK4 » nous avons eu l'occasion d'exploiter un ensemble d'outils à savoir le diagramme d'Ishikawa, le diagramme Pareto et la méthode Simplexe afin de réussir notre mission.

Ainsi, nous avons proposé des recommandations afin de réduire les pertes et d'améliorer l'efficacité énergétique.

Nos solutions proposées se catégorisent en : Solutions efficaces pour réduire voire éliminer les pertes engendrées par les différentes sources de surconsommation et Solution d'optimisation obtenue grâce à la méthode Simplex.

Finalement, nous considérons notre stage comme un apport totalement bénéfique sur les plans humains et techniques car il nous a permis de vivre les problèmes réels de l'industrie tels qu'ils sont posés.

Bibliographie

[1] Mr Chafai, FST Fès : cours de modélisation et programmation Linéaire

http://www.loesche.com/assets/PageContent/Data/Multimedia/Brochures/Cement-Raw-Material/pdf/156_loesche_mills_for_cement_raw_material_F.pdf

http://media.energie-industrie.com/Presentation/011_149_diag_energ_cimenterie_313507.pdf

<http://www.usinenouvelle.com/article/comment-reduire-sa-facture-energetique.N314504>

http://www.flsmidth.com/~media/Brochures/Brochures%20for%20Automation/ProcessExpert_Cement_FR_A3.ashx

<http://jith2013.uca.ma/JITH2013/Communications/JITH393.pdf>

<http://www.skf.com/fr/our-company/the-power-of-knowledge-engineering/the-power-of-knowledge-engineering/concrete-energy-savings/index.html>

<http://cimentquebec.com/a-propos/politique-energie/>

http://www.cdvm.gov.ma/sites/default/files/NI_HOLCIM_FUSION_035_2013.pdf.pdf