Table de matières

Introduction générale ……..…. 6

Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise et description du processus de fabrication ciment …….... 7

I- Présentation de la société Holcim Maroc …… 8
1. Présentation générale …….. 8
2. Fiche signalétique ……... 9
3. L'activité principale de Holcim Maroc……..... 9
4. Les types de ciments produits par Holcim- Ras El Ma …….. 10
II- Généralités sur le ciment …… 11
1. Définition ……..... 11
2. Composition …….…….. 11
III- Description du processus de fabrication du ciment ……13
1. Introduction ……... 13
2. Chaine de production du ciment ……..... 13
3. Description du processus ……..... 14

Cahier de charges ……... 18

Chapitre 2 : Présentation analytique du broyeur ciment BK4 et étude de sa problématique ……. 19

1. Introduction ……... 20
2. Circuit de broyage …… 20
I- Présentation du broyeur BK4 ……... 22
II- Gestion énergétique du broyeur BK4 ……... 24
1. Introduction …… 24
2. Etude de la consommation énergétique ……... 24
III- Analyse des causes de la surconsommation énergétique ……..... 30
1. Diagramme d'Ishikawa …… 30
2. Analyse des causes ……... 31
3. Diagramme Pareto ……..... 34

Chapitre 3 : Recommandations, solutions et élaboration d'un plan d'action à partir d'une analyse AMDEC...38

1. Solutions pour réduire les pertes énergétiques analysées précédemment ……... 39
2. Analyse AMDEC ……..... 41
3. Plan d'action ……..... 46

Conclusion ……..... 48

Annexes ……..... 49

Bibliographie ……..... 52

Figures et tableaux

Figure	Page
Figure 1: Répartition du capital de HOLCIM Maroc	6
Figure 2: Répartition du groupe Holcim dans le monde	7
Figure 3: Chaîne de production du ciment	11
Figure 4: Extraction de la matière	12
Figure 5: Broyeur cru	13
Figure 6: Tour de préchauffage	14
Figure 7: Four rotatif	14
Figure 8: Refroidisseur à grilles	15
Figure 9: Flow-Sheet du circuit de broyage ciment	19
Figure 10: Broyeur vertical à galets Loesche	20
Figue 11: Diagramme représentant les fluctuations de la consommation électrique spécifique du mois Mars	24
Figure 12: Diagramme représentant les fluctuations de la consommation calorifique du mois de Mars	26
Figure 13: Diagramme d'Ishikawa des causes de la surconsommation énergétique	28
Figure 14: Diagramme de rapport Débit/CES/Arrêts	32
Figure 15: Diagramme de Pareto des arrêts broyeur BK4	35
Figure 16: Histogramme de criticité	43

Tableau	Page
Tableau 1: Fiche signalétique de la société Holcim	7
Tableau 2: CES du mois de mars avec production journalière	23
Tableau 3: CCS du mois de mars avec production journalière	25
Tableau 4: Tableau représentant les causes qui influencent sur la CES et la CCS	29
Tableau 5: Le pourcentage d'humidité dans les différents ajouts	29
Tableau 6: Finesse demandée pour chaque qualité de ciment	30
Tableau 7: Les tranches horaires et leur prix pour chaque kWh	31
Tableau 8: Analyse multicritère des arrêts de Jan/Fév/Mar/Avr/Mai	33
Tableau 9: Tableau récapitulatif des données pour l'élaboration du diagramme Pareto des arrêts broyeur ciment	34
Tableau 10: Les différents critères de calcul de la criticité et leur cotation	39
Tableau 11: Tableau AMDEC	40, 41, 42
Tableau 12: Plan d'action	45

Acronymes

Acronymes	Description
SA	Société Anonyme
NM	Norme Marocaine
CPJ	Ciment Portland composé avec ajouts
CPA	Ciment Portland Artificiel
CES	Consommation Electrique Spécifique
CCS	Consommation Calorifique Spécifique
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et leur Criticité
PCI	Pouvoir Calorifique Inférieur
5M	Matériel, Matière, Milieu, Méthode, Main d'œuvre
TA	Temps d'arrêt
NA	Nombre d'arrêts
MTBF	Mean Time Between Failures

INTRODUCTION GENERALE

Ces dernières années, le pays du Maroc est devenu un grand chantier ouvert. De nombreux projets de construction économiques et sociaux ont été construits, d'autres sont en cours de réalisation, ce qui justifie la forte demande sur le ciment.

Pour répondre à cette demande qui est en perpétuelle augmentation, la maitrise du processus de fabrication du ciment est indispensable. Ce processus intègre des technologies diverses dans un environnement en perpétuelle concurrence.

C'est dans ce contexte et dans le cadre de notre projet d'étude que HOLCIM nous a accordés l'opportunité de contribuer à l'optimisation de la marche du broyeur ciment BK4 qui joue un rôle très important dans la fabrication du ciment.

Notre démarche d'optimisation a démarrée par effectuer des suivis de la consommation énergétique, recenser les causes, analyser et trouver des axes d'amélioration qui mènent à un résultat optimal.

Chapitre 1 :

Présentation de l'entreprise et description du processus de fabrication du ciment

[1]

I- Présentation de la société Holcim-Maroc :

Le secteur cimentier est un marché à fort potentiel, il profite de la dynamique enclenchée par le boom immobilier que connait le pays du Maroc ainsi que les grands projets d'infrastructures initiés par l'état.

L'industrie cimentière est devenue l'une des activités industrielles la mieux structurée et la mieux répartie sur le territoire national. Elle réalise, en moyenne, 46% de la production et 50% de la valeur ajouté du secteur «matériaux de construction ».

1. Présentation générale :

Fondée en 1912, Holcim est un groupe suisse leader dans les produits des matériaux de construction pour un usage varié.

Présent dans plus de 70 pays à travers le monde, le groupe est actif dans les secteurs du ciment, des granulats, tels que sable et gravier, ainsi que du béton. Il compte plus de 100 000 employés à travers le monde.

Participant à la construction de la cimenterie d'Oujda en 1978, Le groupe Holcim détient depuis 1993 51% du capital de Holcim Maroc, la banque islamique pour le développement est le second actionnaire avec près de 13.8%, le reste, soit 35,2%, constitue le flottant en bourse.

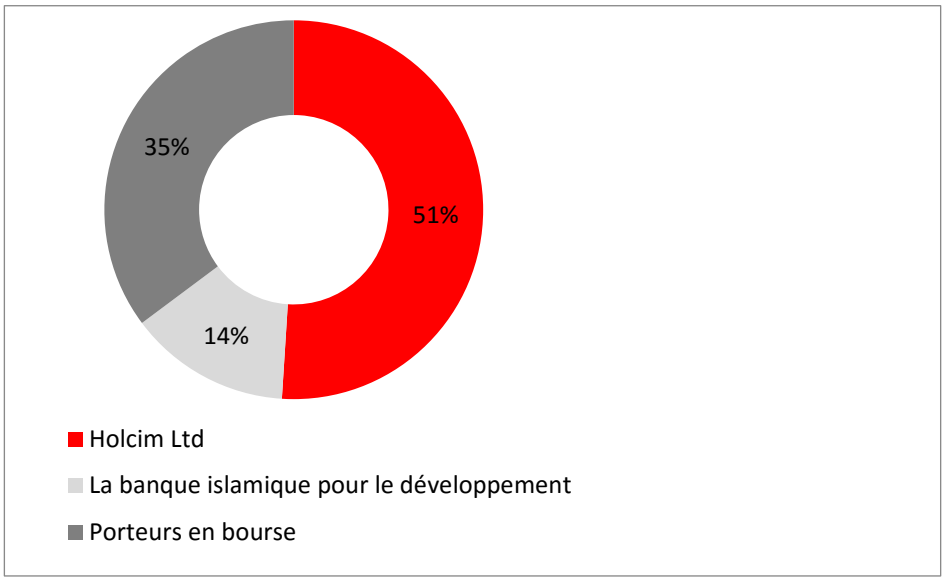


Figure 1: Répartition du capital de HOLCIM

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 2: Répartition du groupe Holcim dans le monde

2. Fiche signalétique :

Raison sociale	HOLCIM Maroc
Forme juridique	Société Anonyme (SA)
Date de création	1976 pour une durée de 99 ans
Capital social	910.000.000 DHS
Activité	Production et commercialisation du ciment et matériaux de construction
Registre Commercial	2471133
Capacité de production	4.5MT/an

Tableau 1: Fiche signalétique de la société Holcim

3. L'activité principale de Holcim-Maroc :

Le ciment est l'une des activités principales de Holcim-Maroc. Elle exploite trois cimenteries (Oujda, Fès et Settat), un centre de broyage, d'ensachage et de distribution (Nador) et un centre d'ensachage et de distribution (Casablanca). Les ciments produits sont certifiés NM (Norme Marocaine des ciments).

La norme classe les ciments suivant leurs résistances normales à 28 jours. Ces classes sont fondées sur la résistance à la compression d'éprouvettes du mortier de ciment, conservées et essayées selon un processus d'essai défini. Trois classes principales sont fixées et désignées par leur résistance moyenne à 28 jours : 35, 45 et 55 Méga pascals. Les classes de résistance sont caractérisées par leurs limites inférieures et supérieures de 10 Méga pascals par rapport à la valeur nominale moyenne.

Rapport-Gratuit.com

4. Les types de ciments produits par Holcim-Ras El Ma :

Il y a trois types de ciments produits par Holcim :

- **CPJ35 : Ciment portland composé avec ajouts**

Le CPJ 35 est un ciment portland composé dont les constituants principaux sont le Clinker et le Gypse. La classe de résistance du CPJ 35 a fait un produit particulièrement adapté à la fabrication des mortiers et des enduits pour la maçonnerie, ainsi que les bétons non armés peu sollicités et à résistances mécaniques peu élevées. Le CPJ 35 est également utilisable dans le domaine routier pour la stabilisation des sols et des couches des chaussées.

- **CPJ 45 : Ciment portland composé avec ajouts**

Le CPJ 45 est un ciment portland composé dont les constituants principaux sont le Clinker et le Gypse. La classe de résistance de CPJ 45 lui confère l'aptitude à être utilisé pour les bétons armés, fortement sollicités et à résistances mécaniques élevées. Les résistances élevées à jeune âge du CPJ 45 permettent d'obtenir un décoffrage rapide des éléments de structure et des produits préfabriqués.

- **CPA 55 : Ciment Portland artificiel**

Le ciment CPA 55 est un ciment portland artificiel composé essentiellement de Clinker et de Gypse. Sa teneur en Gypse est limitée à 3 %. La classe de résistance de 55 MPA et les résistances élevées à jeune âge du CPA 55 lui confèrent l'aptitude à être utilisé pour des applications spécifiques telles que les bétons armés fortement sollicités, les bétons précontraints et les bétons à haute performance. Le CPA 55 est adapté aux applications de la préfabrication nécessitant un décoffrage rapide et un durcissement accéléré.

II- Généralités sur le ciment :

1. Définition :

Le ciment est un liant hydraulique sous forme de poudre minérale finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fut prise et durcit par suite des réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau.

Le constituant principal du ciment est le clinker obtenu à partir de la cuisson d'un mélange approprié de calcaire et de schiste, en proportion moyenne de 80 % de calcaire et 20 % de schiste.

Ces matières premières sont présentes dans les roches naturelles, les marnes ou calcaires argileux. On ajoute généralement des correcteurs tels que le minerai de fer, la fluorine et les schistes.

2. Composition du ciment :

Malheureusement, on ne rencontre qu'exceptionnellement dans la nature un matériau possédant une composition chimique adéquate pour la fabrication du ciment. La plupart du temps, le cimentier doit mélanger deux ou plusieurs matières premières pour obtenir après cuisson un produit ayant les caractéristiques du clinker naturel.

Les matières premières principales sont extraites des carrières situées à proximité de la cimenterie afin de réduire les coûts de transport.

a) Carrière du calcaire :

Holcim n'est pas installée aléatoirement à Ras El Ma, mais c'est à cause de la richesse de cette région en calcaire. Le calcaire est utilisé dans le cru à un taux moyen de (78%).

La carrière de calcaire est située à proximité de l'atelier de concassage de l'usine. Son exploitation se fait par abattage à l'explosif sous forme de deux gradins.

b) Fer :

Le fer intervient pour combler le manque en Fe_2O_3, c'est un minerai correcteur responsable de l'abaissement de la température de clinkérisation.

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

c) Matière de correction :

Les matières de correction sont ajoutées à la matière crue avec des proportions peu importantes, leurs coûts sont très élevés. On ajoute ces matières de correction pour enrichir le mélange (calcaire + schiste) en silice et en fer.

d) Schistes :

Ce sont des schistes purs et homogènes provenant d'une carrière qui se trouve dans la région de Séfrou «Bhalil». Les schistes arrivent sous forme de roches feuilletées puis stockées dans un grand hall avant de les concasser. Les schistes sont utilisés dans le cru à un taux de (16%) au moins.

e) Gypse :

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.

f) Fluorine :

La fluorine est un additif utilisé par HOLCIM uniquement, et celle de RAS EL MA est l'une des trois cimenteries au monde de cette chaine qui utilise la fluorine pour diminuer le coût de fabrication du ciment en abaissant la proportion du clinker dans le produit fini.

g) 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.

III- Description du processus de fabrication du ciment :

1. Introduction :

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

Il existe 4 principaux procédés de fabrication du ciment qui diffèrent entre eux par la nature du traitement thermique utilisé.

- **La voie humide :** La matière première, après son concassage est délavée dans l'eau, puis broyée en humide. La pâte obtenue est homogénéisée, puis alimente le four. Cette méthode est abandonnée pour des raisons d'économie d'énergie.
- **La voie semi humide :** La matière est préparée en voie humide, puis séchée avant le four.
- **La voie semi sèche :** La farine crue, sèche, passe d'abord dans un granulateur où elle est humidifiée.
- **La voie sèche :** C'est la plus utilisée et la plus économique. La matière première, une fois concassée, est broyée à sec, homogénéisée, et avant l'entrée au four, elle est chauffée à travers des cyclones (type DOPOL). A l'entrée du four rotatif, la farine est à une température de 900 à 1000°C. Cette voie est plus rentable et plus optimale au niveau énergétique.

  Le procédé de fabrication du ciment est utilisé à l'usine de RAS EL MA est la voix sèche.

2. Chaîne de production du ciment :

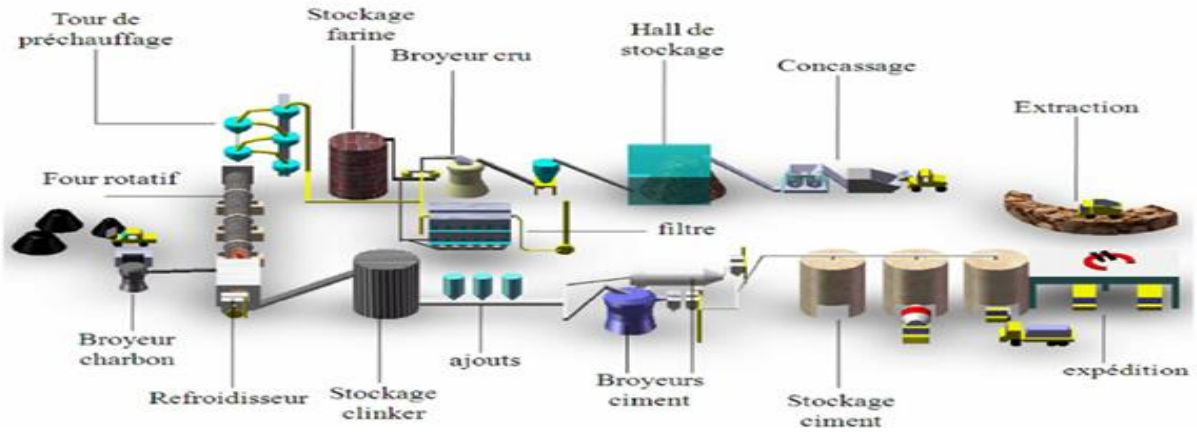


Figure 3: Chaîne de production du ciment

3. Description du processus :

a) L'extraction :

Les matières premières qui entrent dans la fabrication du ciment (carbonate de calcium, silice, alumine et minerai de fer) sont généralement extraites de roche calcaire, de craie, de schiste ou d'argile. Ces matières premières sont prélevées des carrières par extraction ou dynamitage, puis la matière est extraite de la carrière à ciel ouvert, par abattage de la roche au moyen d'explosif, équipée de lourd de forage (sondeuses), d'extraction (chargeuses) et de camions de transport vers concasseur a mâchoire.

Figure 4: Extraction de la matière

b) Concassage :

En vue d'optimiser et faciliter le stockage et la manutention des matières premières, les blocs extraits au niveau de la carrière sont introduits au niveau du concasseur pour réduire leur dimensions (~ 10 - 5 cm). Pour réduire la taille des blocs, le concassage consiste à soumettre les matières premières à des efforts d'impact, d'attraction, de cisaillement ou de compression. Le type du concasseur est choisi en fonction du procédé de concassage adopté par la cimenterie, de la granulométrie dite positionnelle et l'état hydrique des matières premières.

Dès son admission, le produit est amené directement sur le tamis émotteur. Les grains fins passent à travers le tamis situé sur la plaque de percussion. Les grains plus grossiers sont amenés sur le mécanisme de percussion pour être broyés. Ce mécanisme se compose d'un rotor dynamique muni de deux battoirs vissés, et de deux déflecteurs statiques. La roche est projetée par les battoirs du rotor sur les déflecteurs. Ce processus se répète jusqu'à ce que le calibre du produit soit inférieur à l'écartement existant entre les battoirs et les déflecteurs.

Les matières concassées sont transportées par convoyeur sous terrain vers stock des matières premières.

c) Pré-homogénéisation :

La pré-homogénéisation des matières premières est une opération qui consiste à assurer une composition chimique régulière du mélange des matières premières. Des échantillons du mélange des matières premières sont prélevés lors de la constitution des tas dans une station d'échantillonnage, ces échantillons sont analysés au niveau du laboratoire de l'usine. Les résultats de ces analyses permettent de définir les corrections nécessaires à apporter au mélange des matières premières, ce mélange est nommé le cru.

d) Broyage cru :

Le broyage du cru est une opération qui consiste à préparer un mélange homogène avec une bonne répartition granulométrique pour assurer les meilleures conditions de cuisson de la farine. Le broyage du cru consiste à l'introduire dans le broyeur à cru dans lequel il subit des actions mécaniques pour l'obtention de la farine. La farine obtenue (qui est une poudre fine) est stockée dans un silo après avoir subi une opération d'homogénéisation pour obtenir une composition chimique régulière des matières premières qui seront introduites dans le four pour cuisson.

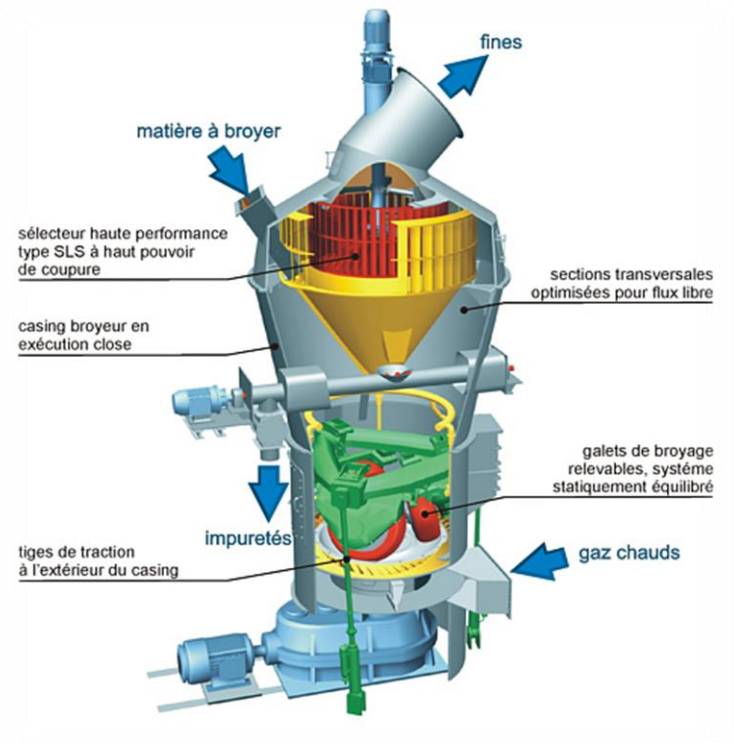


Figure 5: Broyeur cru

Le transport de la farine du cru par des aéroglisseurs risque de générer des poussières. Le système de dépoussiérage consiste à éliminer les émissions des poussières par l'utilisation de filtres à manches ou d'électrofiltres pour une meilleure protection de l'environnement. A noter que le dépoussiérage n'est pas une opération spécifique à la farine, d'autres ateliers (le broyage du ciment par exemple) comportent des systèmes de dépoussiérage.

e) **Cuisson : Fabrication du clinker :**

- **La tour de préchauffage :**

Etape incontournable dans les installations de cuisson moderne (voie sèche, semi-sèche et semi-humide), le préchauffage permet essentiellement de préparer la farine du point de vue chimique et thermique. Cette préparation consiste à sécher, déshydrater et décarbonater partiellement la matière crue en réutilisant une partie de l'énergie calorifique évacuée par les gaz d'exhaure du four. Quelles que soient les technologies utilisées (préchauffeurs à cyclones, grilles Lepol...), les préchauffeurs améliorent donc le rendement thermique global de l'installation de cuisson.

Figure 6: Tour de préchauffage

- **Le four rotatif :**

Les systèmes des fours sont conçus en cimenterie pour répondre aux exigences chimiques du procédé durant lequel la matière crue est transformée en clinker. Le four rotatif est un cylindre en acier reposant sur des stations de roulement, il est garni intérieurement par des produits réfractaires. Durant la cuisson, le four rotatif est animé d'un mouvement de rotation, la disposition en pente du four permet le mouvement de la matière première qui est injectée de l'autre extrémité par rapport à la flamme de chauffe.

Figure 7: Four rotatif

Durant ce déplacement, la matière se transforme par cuisson tout en avançant de son état initial jusqu'à ce qu'elle devienne "clinkérisée" à la température de 1450 °C.

La farine est introduite dans un échangeur thermique pour débuter les premières réactions chimiques. Elle chemine ensuite dans un four rotatif. Sa température est portée à 1450°C. A la sortie du four, un refroidisseur à grille permet de réaliser une trempe à l'air des nodules incandescents et de les ramener à une température d'environ 100°C.

Tout au long de la cuisson, un ensemble de réaction physico-chimique se produit et conduit à l'obtention du clinker.

Différents combustibles sont brûlés, charbon, coke de pétrole, gaz mais aussi des combustibles de substitution (valorisation de résidus d'autres industries comme les anciens pneus).

- **Refroidisseur à grilles :**

Le rôle des refroidisseurs consiste à garantir la trempe du clinker pour avoir une structure minéralogique et des dimensions de cristaux favorables. Les refroidisseurs permettent aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention et le stockage. Il existe plusieurs types de refroidisseurs.

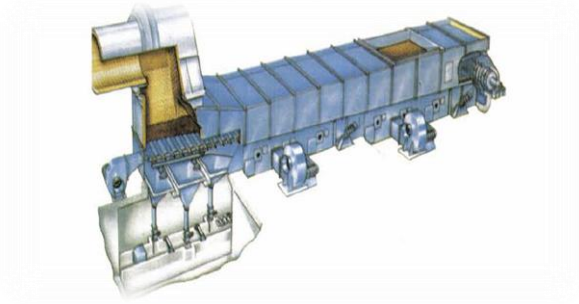


Figure 8: Refroidisseur à grilles

Le clinker produit est trempé (refroidissement rapide) par refroidisseur à grille qui abaisse la température de 1450°C à 100°C par soufflage d'air. Le clinker sortant du refroidisseur est transporté par un élévateur vers un silo de stockage.

f) Broyage ciment :

Le clinker et les ajouts, qui sont des matériaux grossiers par rapport à la granulométrie du ciment, sont introduits au niveau du broyeur dans des proportions prédéfinies pour subir des efforts mécaniques du broyage et produire ainsi le ciment qui est d'une finesse inférieur à 40 microns. L'atelier de broyage comprend le broyeur, le séparateur (qui sélectionne les particules selon leur grosseur), le dépoussiéreur du broyeur et accessoirement la presse à rouleaux.

g) Stock et livraison :

Après sa fabrication, le ciment est acheminé, par voies pneumatiques ou mécaniques, vers des silos de stockage dont la capacité est de plusieurs milliers de tonnes.

Mais pour expédition :

- En sac : Les sacs contiennent généralement 50 Kg de ciment sur lesquels est marquée la classe de résistance du ciment (CPJ 35 ou 45).
- En vrac : la livraison du ciment en vrac se fait sur des citernes. Le ciment est injecté avec l'air dans la citerne jusqu'à ce que le tonnage soit atteint (CPA 55).

Cahier de Charges

[2]

La surconsommation énergétique menace directement la compétitivité-coût des industries les plus intensives en énergies électrique et thermique, celles dont les coûts énergétiques représentent une grande partie des coûts de production, HOLCIM REM paye environ 4 millions de DH par mois, pour sa consommation d'électricité, qui représente jusqu'à 40 % du prix de revient du ciment, ce qui implique la grande attention apportée par la société à ses dépenses énergétiques.

La réduction de la consommation énergétique représente donc une priorité majeure de l'industrie cimentière.

L'impact des arrêts est aussi un facteur majeur dans la disponibilité du broyeur ciment dans la production, et la mauvaise gestion de sa maintenance peut grandement affecter les taux d'arrêts de ce dernier.

C'est la raison pour laquelle notre encadrant de société Mr. **Kassaoui** nous a proposé ce sujet qui consiste à optimiser la consommation énergétique/arrêts/maintenance du broyeur ciment BK4.

Afin de procéder à cela, notre travail consiste à faire :

- L'étude de la consommation électrique spécifique (CES) et la consommation calorifique spécifique (CCS) en traitant les facteurs influençant sur cette dernière à savoir :
    - L'humidité
    - La qualité de ciment
    - L'usure du broyeur
    - Les arrêts

- L'étude des arrêts du broyeur ciment à partir d'une analyse ISHIKAWA/PARETO

- Des recommandations/solutions afin de réduire les pertes et d'améliorer l'efficacité énergétique ainsi que la disponibilité du broyeur ciment BK4.

- L'élaboration d'un plan d'action à partir d'une analyse AMDEC

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

- Identification des équipements concernés
- Surveillance et recueil des données
- Analyse et étude des causes
- Recommandations & solutions

Chapitre 2 :

Présentation analytique du Broyeur Ciment BK4 et étude de sa problématique

Rapport-Gratuit.com

1. Introduction :

Le broyeur à galet de type vertical est un équipement adéquat pour le broyage et le séchage des matériaux humides tel que le ciment. 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

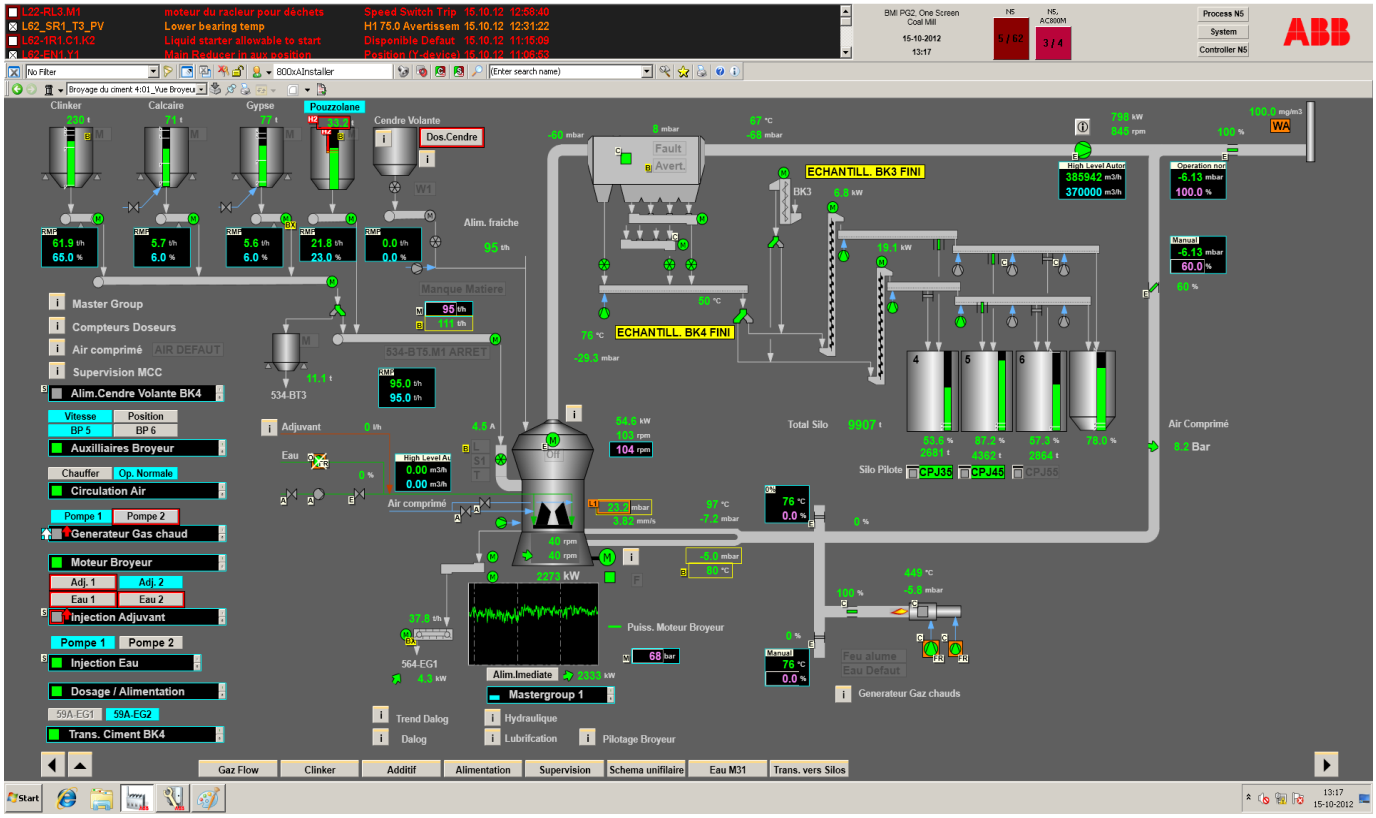
Le broyeur à galets de type vertical réalise 4 fonctions principales dans une seule machine :

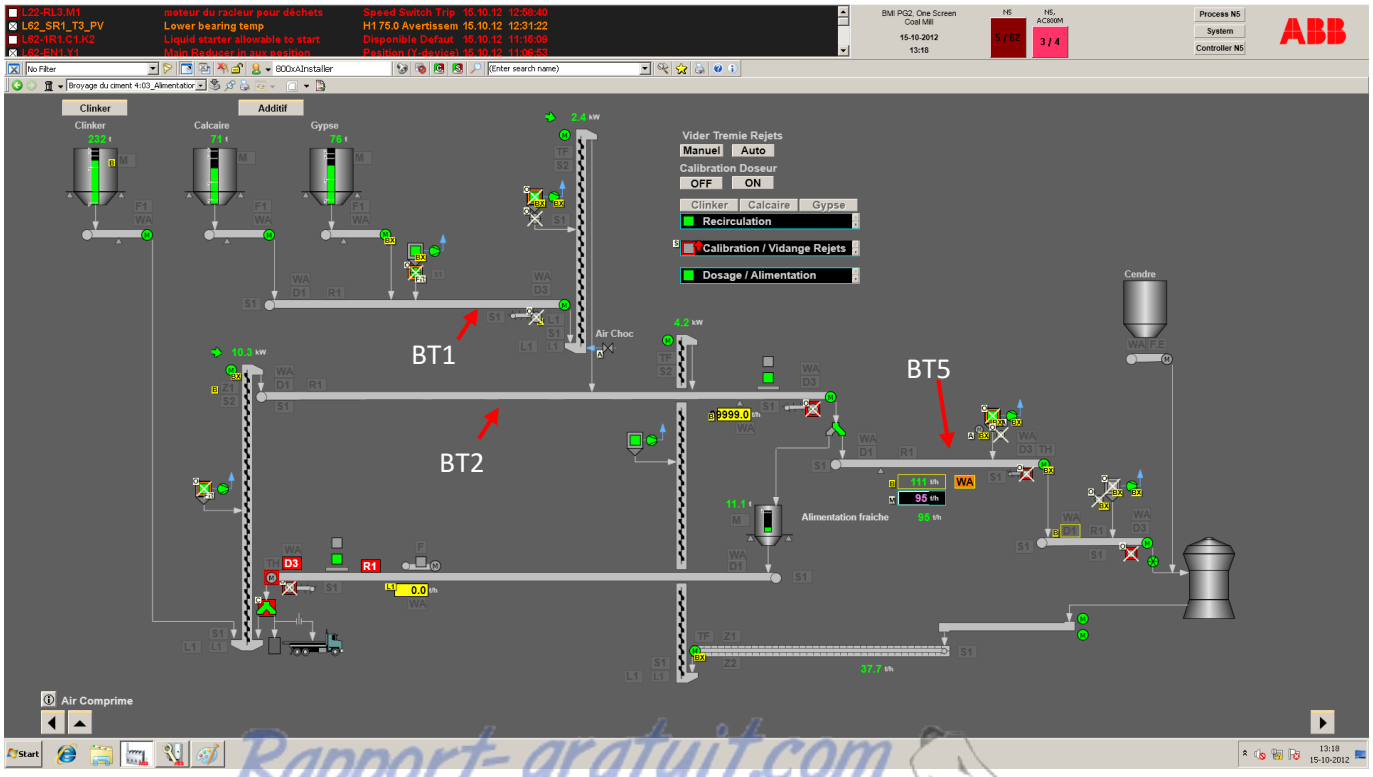
- Le broyage
- Le séchage
- La séparation
- Le transport

2. 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 (CPJ35; CPJ45; CPA55)
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





Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRES

Figure 9: Flow-Sheet du circuit de broyage ciment [3]

I- Présentation du broyeur BK4 : [4]

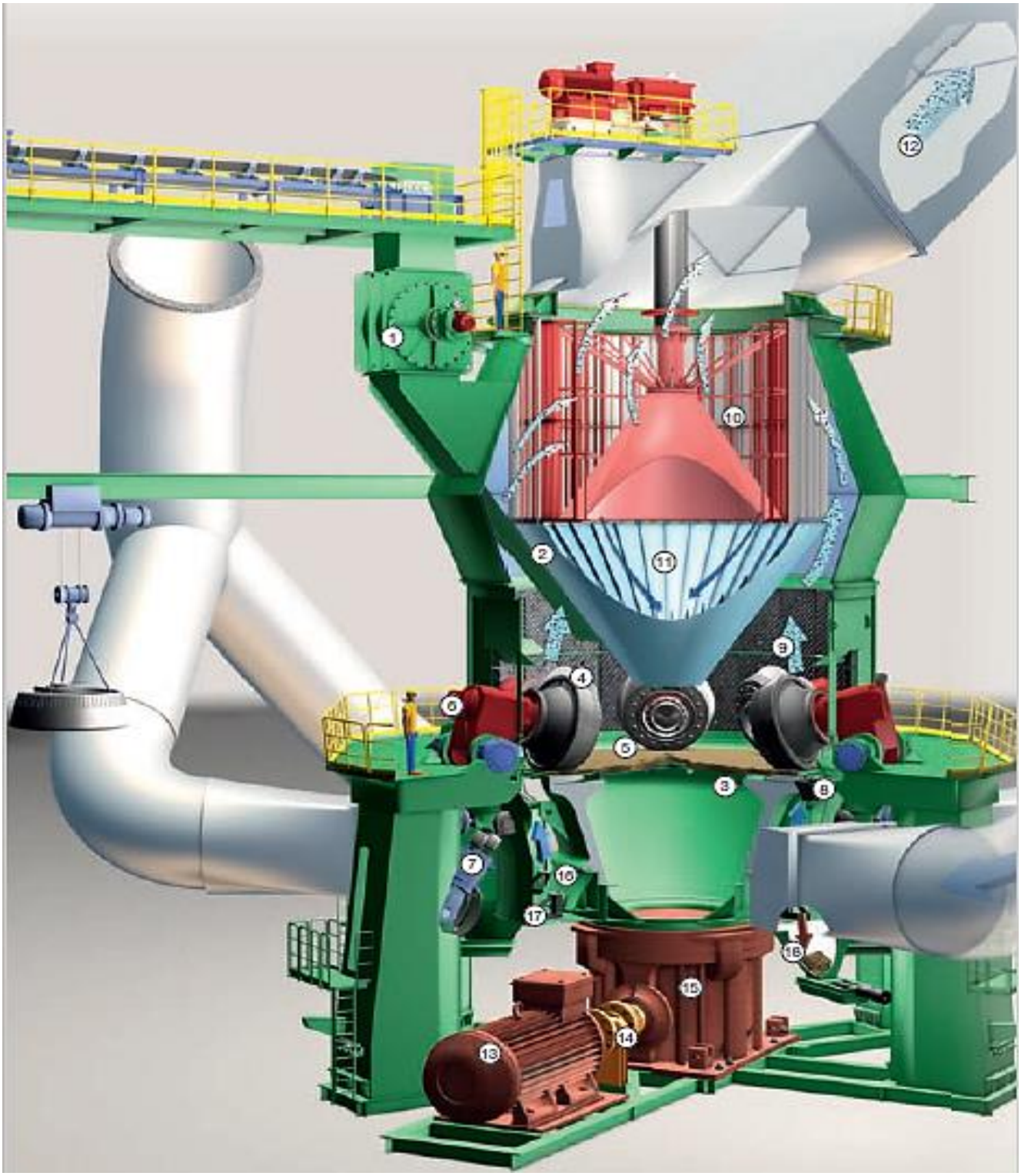


Figure 10: Broyeur vertical à galets Loesche

- 1 SAS : la matière est introduite dans le broyeur par le biais du SAS
- 2 Goulotte
- 3 Plateau de broyage
- 4 Galets : servent à broyer la matière
- 5 Lit de matière
- 6 Levier oscillant
- 7 Vérins des tendeurs à ressort hydropneumatiques
- 8 Couronne à aubes : le flux du gaz chaud généré par le foyer sécheur est introduit dans le broyeur par le biais de la couronne à aubes qui entoure tout le broyeur
- 9 Flux vertical du gaz chaud : permet le séchage et le transport de la matière broyée
- 10 Séparateur : élimine les grosses particules à partir d'une taille déterminée par son réglage et les retourne en recirculation interne
- 11 Matière rejetée
- 12 Flux gazeux
- 13 Moteur
- 14 Accouplement
- 15 Réducteur
- 16 Canal circulaire
- 17 Racleurs : transportent la matière rejetée vers la trémie de rejet
- 18 Trémie de rejet : stock la matière rejetée

II- 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.

Nos analyses se porteront sur le mois de Mars 2015, ce choix est dû au fait que c'est le mois qui représentait le plus de fluctuations énergétiques par rapport aux autres mois et donc qui nous permettrait de démontrer au mieux les pertes occasionnées et leurs causes.

2. Etude de la consommation énergétique

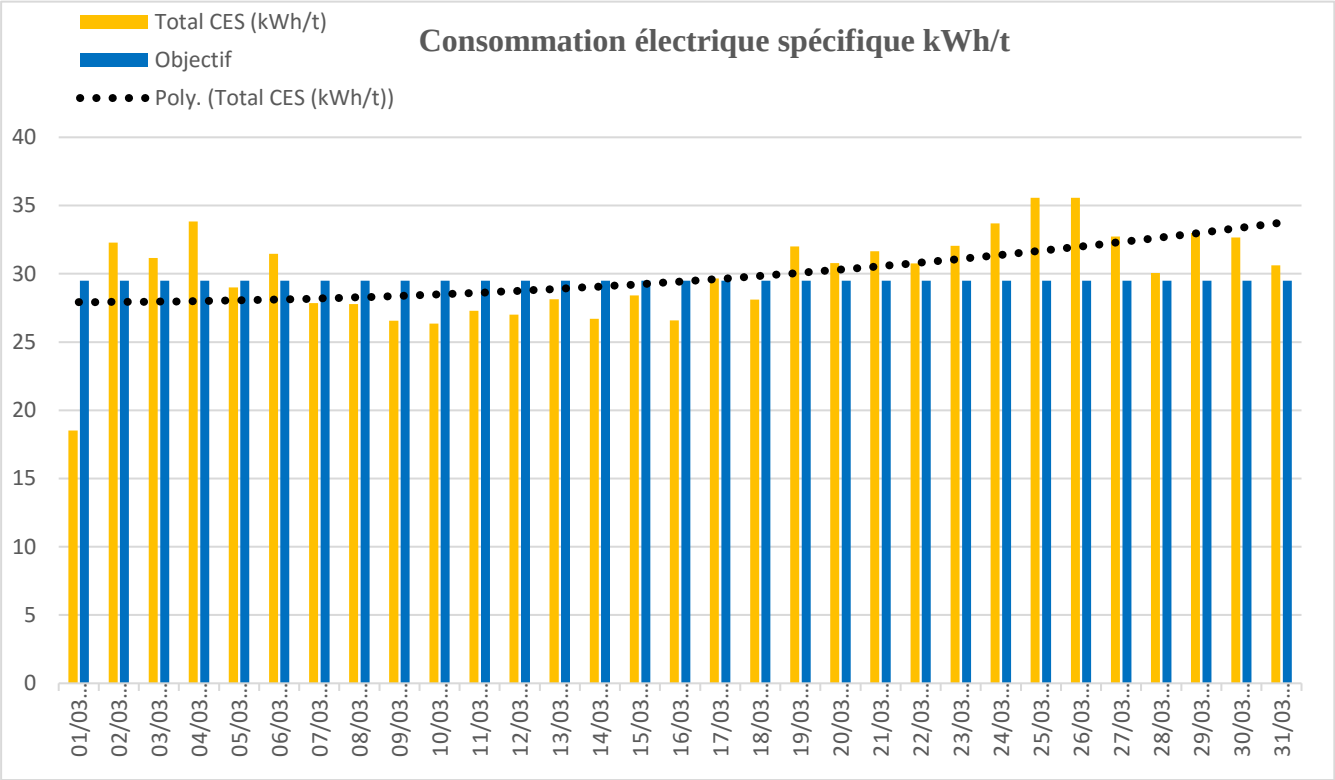
Afin de mener une étude complète, nous avons fait un suivi de la consommation énergétique pendant le mois Mars 2015 :

- *Suivi de la consommation électrique spécifique (CES) :*

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

Date	CES (kWh/t)			Production en t	Total CES (kWh/t)
	Moteur BK4	Ventilateur	Auxiliaires		
01/03/2015	11,8	4,35	2,37	2067	18,53
02/03/2015	17,95	9,64	4,7	830	32,29
03/03/2015	33,1	8,15	3,73	1717	31,15
04/03/2015	17,56	13,02	3,24	2004	33,83
05/03/2015	17,32	8,32	3,35	1790	29
06/03/2015	19,54	8,8	3,13	1341	31,47
07/03/2015	17,01	7,74	3,11	2093	27,85
08/03/2015	17,47	7,68	2,63	2095	27,78
09/03/2015	16,05	7,69	2,83	2262	26,57
10/03/2015	15,71	7,56	3,09	1878	26,35
11/03/2015	16,59	7,57	3,14	2073	27,3
12/03/2015	16,67	7,69	2,65	2147	27,01
13/03/2015	17,7	7,65	2,78	2051	28,13
14/03/2015	16,25	7,42	3,02	2184	26,7
15/03/2015	17,72	7,45	3,25	2094	28,41
16/03/2015	16,11	7,39	3,09	2166	26,59
17/03/2015	17,89	8,24	3,53	1699	29,66
18/03/2015	17,12	7,88	3,11	2120	28,11
19/03/2015	20,25	8,23	3,53	1896	32,01
20/03/2015	19,32	8,08	3,4	1708	30,79
21/03/2015	20,22	8,17	3,27	1958	31,66
22/03/2015	18,98	7,91	3,87	1138	30,75
23/03/2015	20	7,84	4,22	1020	32,05
24/03/2015	21,15	8,71	3,84	1641	33,7
25/03/2015	21,68	8,65	5,25	821	35,56
26/03/2015	20,95	9,6	4,5	964	35,58
27/03/2015	19,7	8,66	4,6	1051	32,73
28/03/2015	18,3	8,08	6,1	1869	30,06
29/03/2015	20,86	8,46	3,26	1985	33
30/03/2015	19,47	8,51	4,68	940	32,66
31/03/2015	18,35	8,27	4,02	1270	30,63

Tableau 2: CES du mois de Mars avec production journalière



Figue 11: Diagramme représentant les fluctuations de la consommation électrique spécifique du mois Mars

- **Interprétation du diagramme :**

Le diagramme représente les fluctuations de l'énergie électrique spécifique consommée durant le mois de Mars en les comparants avec l'objectif visé. L'énergie qu'on est censé ne pas dépasser pour éviter les pertes est de 29.5 kWh/t qu'on appelle l'objectif. Nous remarquons suite à la courbe de tendance qu'elle est en hausse et donc la consommation de l'énergie électrique spécifique augmente et dépasse l'objectif. Cela se traduit par des pertes considérables de l'énergie électrique.

➢ *Suivi de la consommation calorifique spécifique (CCS) :*

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

$E_{Calorifique}$ = 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

Date	T fuel(t)	E calorifique (MJ/t)	Production (t)
01/03/2015	4	77,75	2067
02/03/2015	2	96,76	830
03/03/2015	4	93,59	1717
04/03/2015	4	80,19	2004
05/03/2015	3	67,35	1790
06/03/2015	2	59,9	1341
07/03/2015	5,09	97,69	2093
08/03/2015	4	76,73	2095
09/03/2015	4	71,73	2262
10/03/2015	4	85,55	1878
11/03/2015	2	38,76	2073
12/03/2015	4	74,86	2147
13/03/2015	4	78,37	2051
14/03/2015	4	73,59	2184
15/03/2015	4	76,73	2094
16/03/2015	4,39	81,43	2166
17/03/2015	4	94,6	1699
18/03/2015	2	37,89	2120
19/03/2015	2	42,37	1896
20/03/2015	3	70,58	1708
21/03/2015	4	82,08	1958
22/03/2015	2	70,6	1138
23/03/2015	2	78,76	1020
24/03/2015	4	97,93	1641
25/03/2015	2	97,91	821
26/03/2015	1,23	51,1	964
27/03/2015	2	76,48	1051
28/03/2015	3	64,49	1869
29/03/2015	4	80,95	1985
30/03/2015	2	85,47	940
31/03/2015	3	94,92	1270
Mensuel	Σ Tfuel= 98,70	Moy Ecal= 75, 21	Σ Prod= 52 872

Tableau 3: CCS du mois Mars avec production journalière

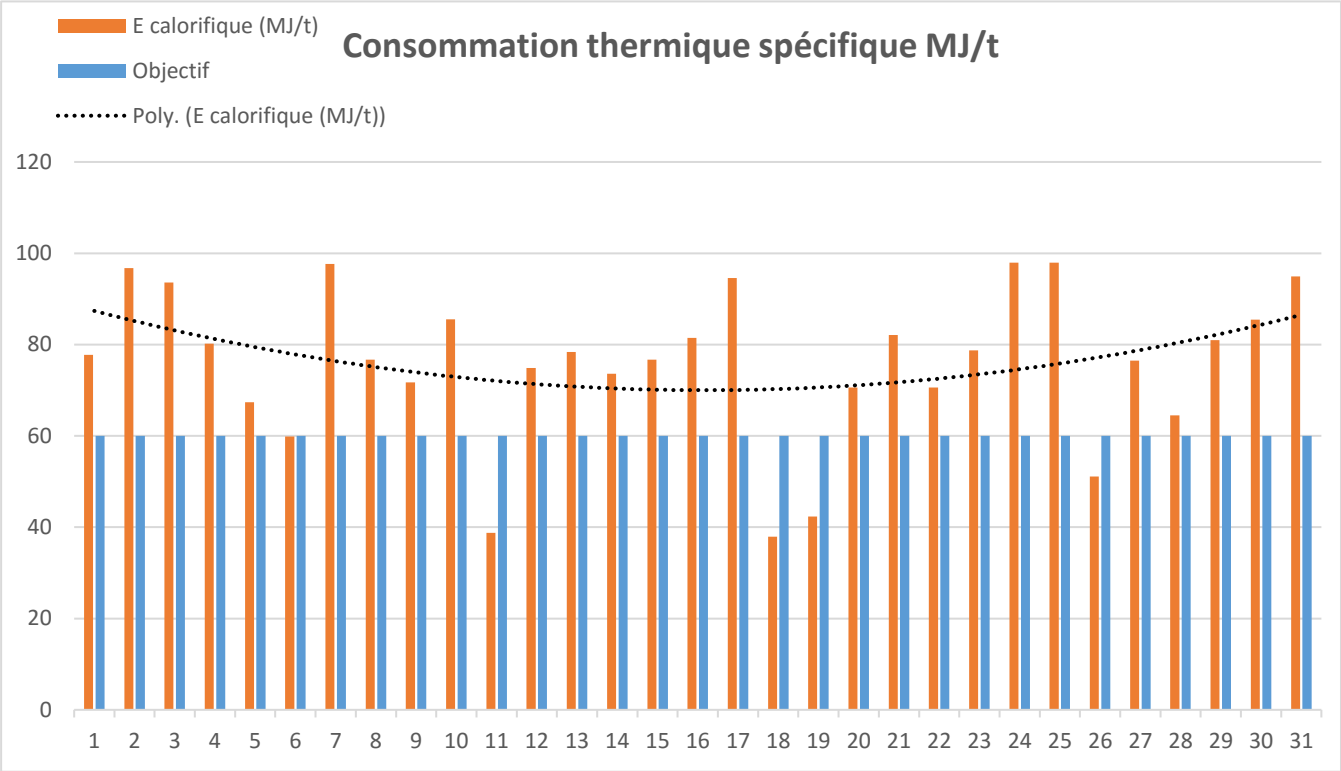


Figure 12: Diagramme représentant les fluctuations de la consommation calorifique du mois de Mars

- **Interprétation du 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 que la consommation connait une haute variation tout au long du mois avec des valeurs allants jusqu'à 97.93 MJ/t. 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 de 75.21 MJ/t et l'objectif 60 MJ/t, donc la différence est de l'ordre de 20% ce qui est non négligeable du tout.

Cela est dû à plusieurs facteurs engendrant cette surconsommation, et par la suite l'objectif ciblé parait loin d'être réalisé en l'absence d'une optimisation réelle de la consommation calorifique au niveau du broyeur.

- **Calcul des pertes :**

En se basant sur les **tableaux 2 et 3,** on va calculer les dépassements par rapport aux objectifs visés par HOLCIM en kWh/t et en MJ/t cumulés respectivement pour le mois de Mars :

On va considérer une surconsommation toute consommation spécifique au-delà de la valeur fixée par HOLCIM qui est de 29,5 kWh/t pour l'énergie électrique et 60 MJ/t pour l'énergie calorifique.

$$\Delta\, CES = \sum dépassements = \sum(CES\,\max - CES\ obj) = 48.58\ \text{KWh/t}$$

$$\Delta\, CCS = \sum dépassements = \sum(CES\,\max - CES\ obj) = 567.03\ \text{MJ/t}$$

Le broyeur marche en moyenne 14,56h/j (hors heures d'arrêts programmés) et consomme donc beaucoup d'énergie, avec une production moyenne de 1705.55 t/j de ciment.

Donc on évalue les pertes de consommation électrique liées aux heures de production par rapport à l'objectif visé par Holcim par la relation suivante :

$$\Delta\, CES\ (kWh/t) \times\ Production\ moyenne\ (t) = 48.58\ kWh/t * 1705.55\ t = \mathbf{82855.619\ KWh}$$

Et la consommation calorifique :

$$\Delta\, CCS\ (MJ/t) \times\ Production\ moyenne\ (t) = PCI\ \times Tfuel\ \times 4{,}185$$

$$\Rightarrow\quad Tfuel = \frac{567.03.10^6\ J/t \times 1705.55\ t}{9600.10^6\ cal/t \times 4{,}185\ J} = 24.07\ \text{t}$$

Sur la base d'un prix unitaire du KWh de 0,7 DH/KWh et d'un prix unitaire du fuel de 6000DH/t, on obtient des pertes estimables à :

57 999 DH (électrique) + 144 429DH (calorifique) = 202 427 DH

Rapport-Gratuit.com

III- Analyse des causes de la surconsommation énergétique :

1. Diagramme d'Ishikawa [5]

Suite au calcul effectué précédemment, les pertes énergétiques s'élèvent à **82 855 kWh** et **24,07 tonnes de fuel**, ce qui représente en somme **202 427 DH**, une somme qui est considérable !

Il est donc indispensable de remonter aux causes grâce à un **diagramme d'Ishikawa** qui illustre une représentation bien structurée de l'ensemble des causes qui entrainent une surconsommation.
Le schéma comprend des facteurs causaux identifiés et catégorisés selon la règle des 5M :

Matériel, Matière, Milieu, Méthode et Main d'œuvre.

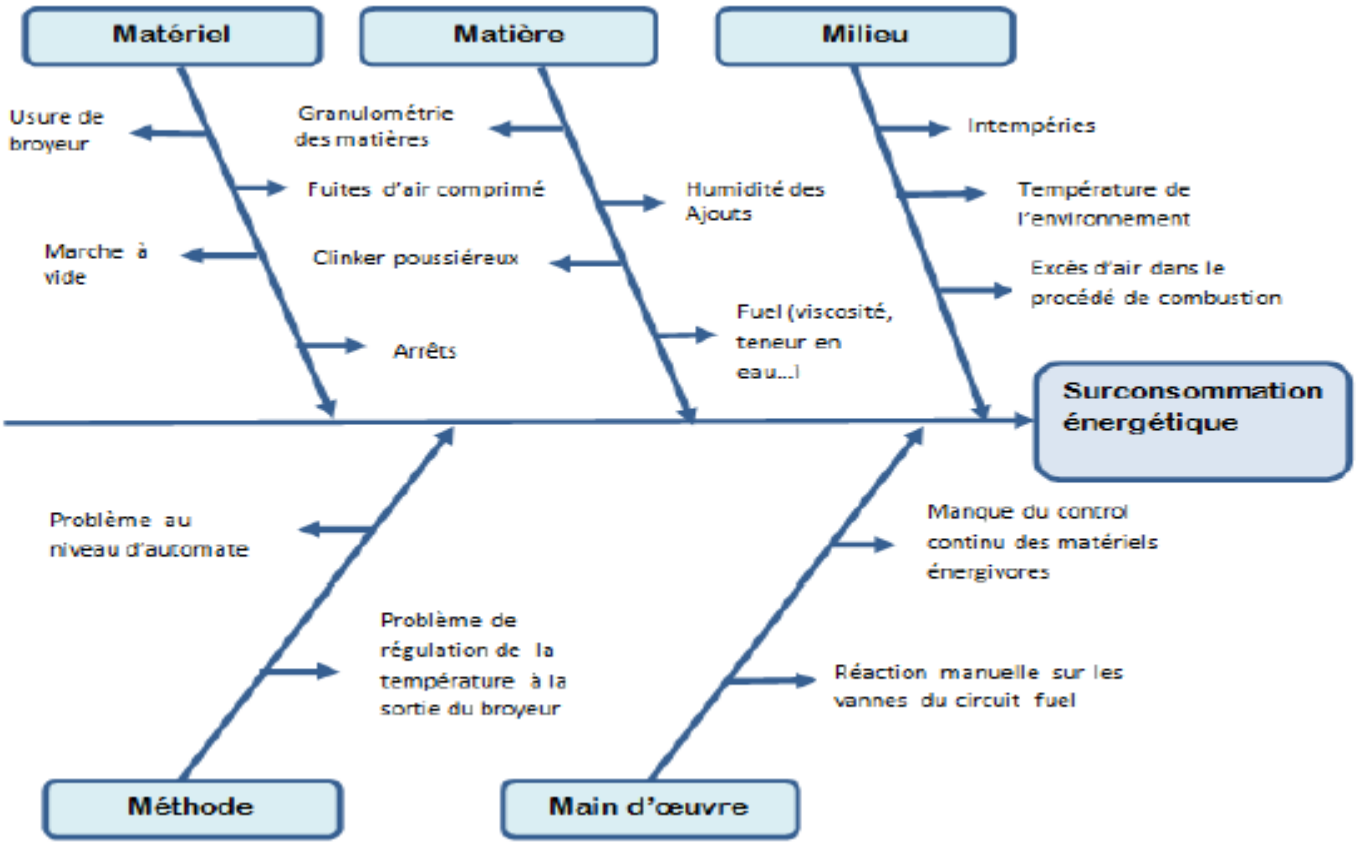


Figure 13: Diagramme d'Ishikawa des causes de la surconsommation énergétique

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.

	Energie Electrique	Energie Thermique
L'humidité des ajouts	✓	✓
Qualité de ciment (Granulométrie de la matière)	✓	
Usure du broyeur	✓	
Les arrêts	✓	✓

Tableau 4: Tableau représentant les causes qui influencent sur la CES et la CCS

a- L'humidité :

L'humidité est la présence d'eau ou de vapeur d'eau dans l'air ou dans une substance. Afin de garantir un broyage facile et sans perte d'énergie, la matière entrainée dans le broyeur ciment doit être sèche.

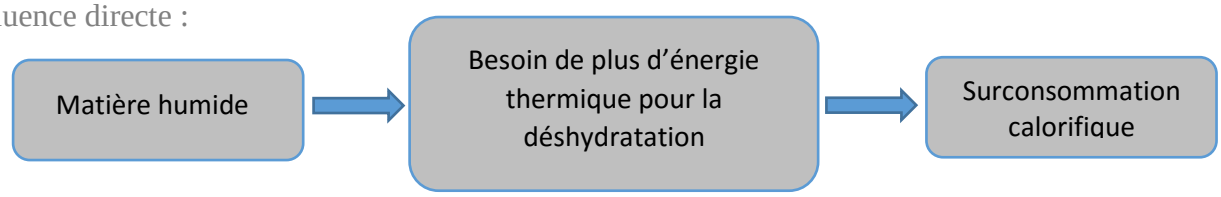
En effet, le grand pourcentage d'humidité est présent dans les ajouts ce qui engendre une diminution de la température du broyeur et donc la nécessité d'énergie thermique pour la déshydratation d'où l'augmentation de la consommation énergétique.

Matière	% Humidité
Calcaire	5,78%
Gypse	6,12%
Pouzzolane	9,73%

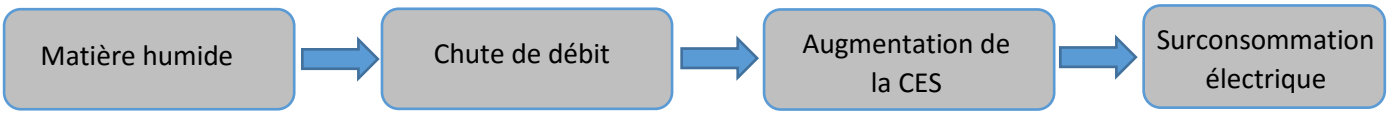
Tableau 5: Le pourcentage d'humidité dans les différents ajouts

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

- Influence directe :



- Influence indirecte :

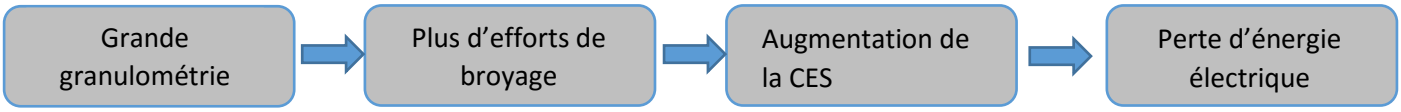


b- La qualité de ciment

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.

Qualité de ciment	Finesse
CPJ 35	13%
CPJ 45	7%
CPA 55	5%

Tableau 6: Finesse demandée pour chaque qualité de ciment



c- Usure du broyeur :

La forte usure au sein du broyeur ciment peut augmenter la consommation électrique spécifique (CES). En effet, cette usure se manifeste par une dégradation sous l'effet de sollicitations répétées et prolongées du processus du broyage, et peut affecter plusieurs organes tels que les galets, la piste rotative …etc.

Des organes usés causent un ralentissement du débit et une augmentation de la CES.

Prenons l'exemple des galets qui sont parmi les organes les plus importants dans le broyeur ciment, plus ils sont usés et plus ils demandent de temps pour broyer la matière et par la suite plus d'énergie est nécessaire pour le processus.

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 chère.

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

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

Tableau 7: Les tranches horaires et leur prix pour chaque 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 confronter une société sont les arrêts imprévus des équipements qui inévitablement engendrent une grande perte d'énergie au sein de l'usine. L'équipe Holcim a 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 avons réalisé une analyse Pareto des arrêts qui ont eu lieu pendant les mois de Janvier, Février, Mars, Avril et Mai 2015.

Avant de présenter notre analyse Pareto, on a réalisé un diagramme démontrant le rapport entre le débit de production du mois de mars, sa CES et les arrêts qui y ont eu lieu (4.6h d'arrêts cumulées):

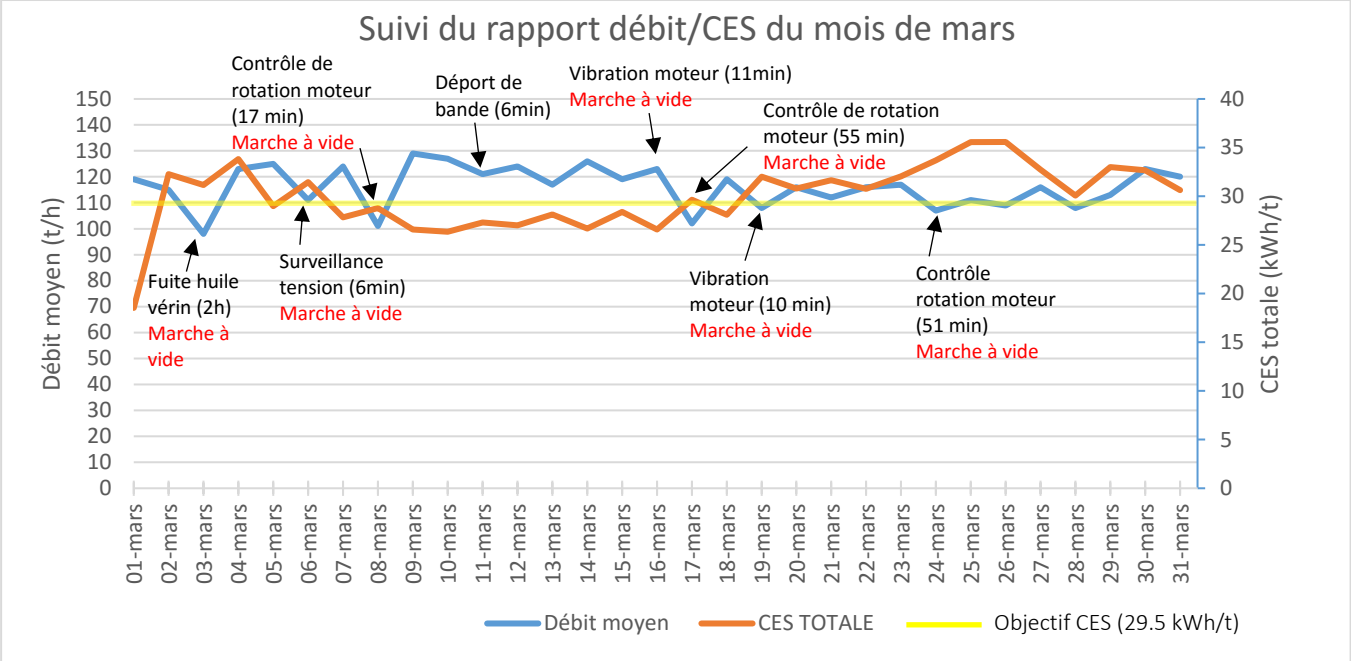


Figure 14: Diagramme de rapport Débit/CES/Arrêts

On remarque des baisses de débit et augmentation de la CES proportionnellement qui peuvent être importants selon les arrêts en question, ces fluctuations inversées du débit et la CES sont majoritairement dû aux marches à vide.

3. Diagramme Pareto [6]

Le diagramme Pareto permet de hiérarchiser les problèmes en fonction du nombre d'occurrences et leur durée 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% des causes sur lesquelles il faut agir pour résoudre 80% des problèmes. Il sera utile pour déterminer sur quels problèmes on doit agir en priorité pour améliorer de façon significative la situation.

Notre analyse Pareto se portera sur les 5 premiers mois de l'année 2015. Nous jugeons qu'une analyse bien élaborée de ces mois est suffisante pour donner une vue d'ensemble sur le travail qu'on veut réaliser dans notre projet.

a- Analyse Multicritère :

L'analyse par pondération est un outil d'évaluation multicritère, elle nous permet de classer les différents arrêts selon un ordre d'importance en prenant en compte la durée des arrêts et leur fréquence. Nous avons utilisé dans notre analyse une pondération P égale à 5 pour le critère de la fréquence d'arrêts et pour le temps d'arrêt.

Ta : Temps d'arrêt (h) Na : Nombre d'arrêts P : Pondération = 5

Equipement	Temps d'arrêt Ta (h)	Ta*Pondération	Nombre d'arrêts Na	Na*Pondération	Ta*P + Na*P
Bande	0,55	2,75	2	10	12,75
Bande BT1	0,06	0,3	1	5	5,3
Bande BT2	0,15	0,75	1	5	5,75
Broyeur (Vérin)	2	10	1	5	15
Broyeur (Sonde contre pression)	1,85	9,25	2	10	19,25
Broyeur (Niveau Silo)	0,1	0,5	1	5	5,5
Bypass (Coincement)	0,8	4	6	30	34
Chaine refus	0,2	1	2	10	11
Elévateur	0,8	4	4	20	24
Elévateur ciment	4,45	22,25	1	5	27,25
Filtre process (Diff. Pression)	5,6	28	4	20	48
Filtre process (Disponibilité)	0,06	0,3	1	5	5,3
Foyer sécheur	1,45	7,25	2	10	17,25
Moteur (Vibration)	5,85	29,25	22	110	139,25
Moteur (Puissance)	0,12	0,6	2	10	10,6
Moteur (Contrôle rotation)	5,9	29,5	10	50	79,5
Moteur (Disp. Pompe graissage)	0,25	1,25	1	5	6,25
Moteur (Microcoupure)	0,8	4	4	20	24
Pompe hydraulique	0,94	4,7	2	10	14,7
Redler refus (Surv. tension)	2,24	11,2	13	65	76,2
Redler refus (Rotation)	0,1	0,5	1	5	5,5
SAS	0,65	3,25	2	10	13,25
Séparateur	4,2	21	2	10	31
					Σ (Ta*P + Na*P) = 630,6

Tableau 8: Analyse multicritère des arrêts de Jan/Fév/Mar/Avr/Mai

b- Analyse Pareto :

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

$$\%\ \boldsymbol{arrêts}\ (\boldsymbol{chaque\ arrêt}) = \frac{\boldsymbol{Ta} * \boldsymbol{P} + \boldsymbol{Na} * \boldsymbol{P}}{\sum\ (\boldsymbol{Ta} * \boldsymbol{P} + \boldsymbol{Na} * \boldsymbol{P}\ )}$$

Equipement	% Arrêts	% Cumulés
Moteur (Vibration)	22,08	22,08
Moteur (Contrôle rotation)	12,6	34,68
Redler refus (Surv. tension)	12,08	46,76
Filtre process (Diff. Pression)	7,61	54,37
Bypass (Coincement)	5,39	59,76
Séparateur	4,91	64,67
Elevateur ciment	4,32	68,99
Elevateur	3,8	72,79
Moteur (Microcoupure)	3,8	76,59
Broyeur (Sonde contre pression)	3,05	79,64
Foyer sécheur	2,73	82,37
Broyeur (Vérin)	2,38	84,75
Pompe hydraulique	2,33	87,08
SAS	2,1	89,18
Bande	2,02	91,2
Chaine refus	1,74	92,94
Moteur (Puissance)	1,68	94,62
Moteur (Disp. Pompe graissage)	0,99	95,61
Bande BT2	0,91	96,52
Broyeur (Niveau Silot)	0,87	97,39
Redler refus (Rotation)	0,87	98,26
Bande BT1	0,84	99,1
Filtre process (Disponibilité)	0,84	100

Tableau 9: Tableau récapitulatif des données pour l'élaboration du diagramme de Pareto des arrêts du broyeur ciment

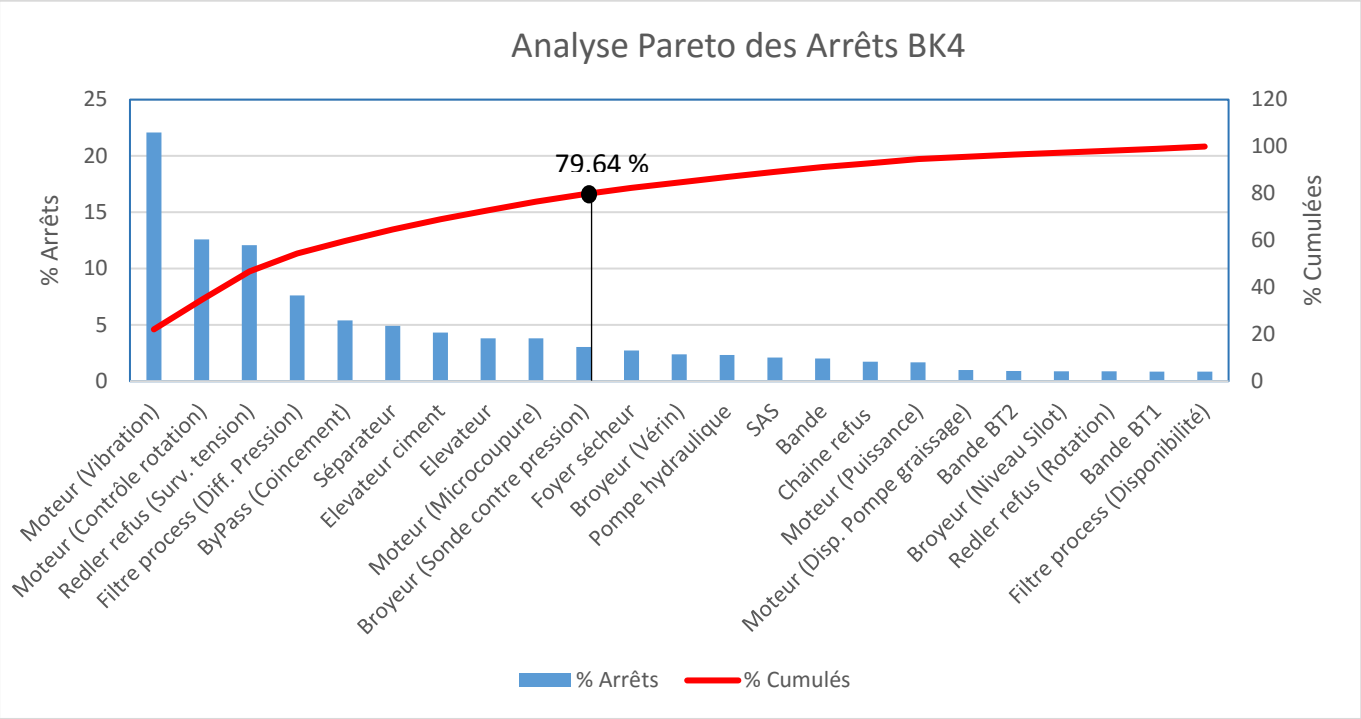


Figure 15: Diagramme de Pareto des arrêts broyeur BK4

- **Interprétation du diagramme :**

Nous remarquons d'après le diagramme Pareto que les arrêts par vibration au niveau du moteur représentent 22.08% de la totalité des arrêts ou bien les arrêts par contrôle de rotation qui totalisent 12.6% des arrêts ou encore les problèmes de tension au niveau du Redler, le moteur étant 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. 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.

Chapitre 3 :

Recommandations, solutions et élaboration d'un plan d'action à partir d'une analyse AMDEC

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 comme on a pu le constater, 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 électrique et calorifique d'une cimenterie.

a- Humidité :

Afin de diminuer le taux d'humidité des matières premières utilisées, il est conseillé de les stocker 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 à défaut de former des blocs à nouveau par cause de présence d'eau.

Une autre solution consiste à installer un système de préchauffage (en utilisant les flux de gaz chauds qui sont normalement perdus depuis le four) dans les trémies et doseurs afin de chauffer les différentes matières et alimenter le broyeur par la suite en étant à faible humidité ce qui réduirait le temps nécessaire au broyage de la matière ainsi que la réduction de la consommation calorifique propre au broyeur ciment.

b- L'usure du broyeur :

Afin de réduire les pertes d'énergie électrique dues à l'usure du broyeur, il est indispensable de chercher des solutions qui visent 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.
- 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.

c- Installations des variateurs de vitesse :

Un variateur de vitesse est un équipement permettant de faire varier la vitesse d'un moteur, une nécessité pour de nombreux procédés industriels.

En effet, la plupart des moteurs tournent à vitesse constante. Pour moduler la vitesse des équipements de procédé, le recours aux variateurs de vitesse est indispensable, sachant qu'il offre les avantages suivants :

- Démarrage progressif des moteurs réduisant les chutes de tension dans le réseau et limitant les courants de démarrage.

Rapport-Gratuit.com

- Précision accrue de la régulation de vitesse.
- Prolongement de la durée de service du matériel entraîné.
- Diminution de la consommation d'électricité. De nouveaux variateurs de vitesse plus performants peuvent éviter l'interruption des procédés en cas de perturbation du réseau de courte durée (Microcoupures).

d- Récupération des gaz chauds du four :

Il serait bénéfique d'installer un système de récupération des gaz chauds dégagés par le four vers l'air extérieur à travers le flux naturel, et ceci afin de profiter de l'énergie thermique présente dans ces gaz pour l'utiliser dans les procédés nécessitant de l'énergie thermique.

e- Régulation du foyer sécheur :

Une autre solution consiste à la régulation du foyer sécheur : En effet, toute augmentation du débit engendre une augmentation de l'énergie thermique afin de sécher la matière et cela peut diminuer la consommation électrique.
La régulation consiste à suivre de façon continue la température de sortie du broyeur. Ainsi, en se basant sur cette valeur, on peut contrôler la température du foyer sécheur en agissant sur la quantité du fuel à consommer.
Pour remédier à ce problème, il est judicieux d'installer des analyseurs d'oxygène ce qui permet d'améliorer davantage le suivi de la combustion.

f- Les arrêts :

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

L'énergie consommée durant les tranches horaires de super pointes coutent presque 3 fois plus que celle consommée durant les heures creuses (D'après le **Tableau 7**). 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 indispensable de minimiser les pannes et les arrêts imprévus.
Dans l'axe qui a précédé (Analyse des causes), nous avons présenté les différents arrêts qui ont eu lieu durant les mois de Janvier, Février, Mars, Avril et Mai. Et après avoir fait une analyse Pareto, il est nécessaire de chercher les causes d'arrêts et de proposer des actions préventives et correctives.
Pour ce faire, nous avons optés pour une analyse AMDEC des arrêts de ces 5 mois.

2. Analyse AMDEC [7]

a- Présentation :

L'**AMDEC** (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et leur Criticité) est une méthode d'analyse de la fiabilité qui permet de recenser les défaillances dont les conséquences affectent le fonctionnement du système et de proposer les solutions adéquates (Actions).
La criticité est calculée selon le produit de 3 critères : Fréquence, Gravité et Non Détection.
Chaque critère bénéficie d'une note selon la défaillance en question comme suit :

Fréquence F		Gravité G		Non détection N	
Cotation	Définition	Cotation	Définition	Cotation	Définition
1	Défaillance moins d'une fois par mois	1	Pas d'arrêt de la production	1	Signe évident de défaillance
2	Défaillance moins d'une fois par quinzaine	2	Arrêt <= 1 heure	2	Facile à détecter, mais nécessite une action particulière
3	Défaillance moins d'une fois par semaine	3	1 heure < Arrêt <= 1 jour	3	Détection difficile
4	Défaillance plus d'une fois par semaine	4	Arrêt > 1 jour	4	Indécelable

Tableau 10: Les différents critères de calcul de la criticité et leur cotation

b- Tableau AMDEC :

On a recensé les différents arrêts qui ont eu lieu lors des 5 mois précédemment cités en analysant les différentes causes susceptibles de causer ces arrêts ainsi que leur effet sur les différents composants du circuit de broyage ciment, en prenant soin d'attribuer les notes de **F**réquence, **G**ravité et **N**on détection à chaque arrêt afin d'évaluer leur criticité et proposer par la suite des actions exploitables.

Le résultat est le suivant :

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MÉMOIRES

Sous-élement	Fonction	Mode de défaillance	Cause de défaillance	Effet de la défaillance	Moyen de détection	Criticité				Actions
						F	G	N	C	
Moteur	Transformer l'énergie électrique en énergie mécanique pour entrainer le broyeur	Problème de rotation(contrôle rotation)	*Problème au niveau du réducteur *Problème électrique	*Arrêt du broyeur *Grillage moteur	Automatique	2	3	2	12	*Fiabilité détecteur rotation *Maintenance systématique et préventive du moteur
		Microcoupure	*Problème réseau électrique	*Arrêt bref broyeur (selon la période de coupure)	Auto/Visuel	1	2	2	4	*Programmation d'un système de temporisation des coupures afin d'éviter l'arrêt immédiat d'un composant et éviter les redémarrages fréquents qui consomment beaucoup d'énergie
		Puissance	*Bourrage *Alimentation faible	*Dépassement de 3000kWh=Arrêt broyeur *Faible puissance= Vibrations	Automatique	1	2	2	4	*Régulation du débit
		Disponibilité pompe graissage	*Manque de graisse *Fuite circuit graisse	*Arrêt broyeur	Auto/Visuel	1	2	1	2	*Vérification périodique réservoir graisse *Programmer une maintenance systématique et préventive du circuit graissage
		Vibrations	*Défaillance roulement *Mauvais alignement avec réducteur *Fixation défectueuse	*Arrêt broyeur en cas de dépassement de 7.1mm/s	Automatique	4	3	2	24	*Prévoir l'installation de la nouvelle géneration de réducteurs COPE drive (système d'entrainement munis de variateurs) *Contrôle régulier de l'accouplement moteur
Filtre process	Séparer les gaz de la matière	Différence de pression	*Bourrage *Défaillance sonde détection	*Arrêt broyeur *Bourrage broyeur	Automatique	1	3	2	6	*Contrôle régulier des manches *Fiabilité sonde de détection *Vérification régulière de la pression d'air afin de la maintenir entre 7,5 et 8 bars
		Disponibilité filtre process	*Arrêt battage par manque d'air *Problème électrique	*Arrêt broyeur	Auto/Visuel	1	2	2	4	*Contrôle des compresseurs d'air et disponibilité d'air *Contrôle battage *Maintenance électrique systématique
Bypass	Empêcher la matière de passer à la ligne de production en présence d'un corps étranger	Coincement Bypass	*Coincement mécanique *Coincement par matière *Problème pneumatique	*Arrêt alimentation broyeur *Montée des galets	Auto/Visuel	2	1	2	4	*Vidange périodique de la trémie refus pour éviter le dépassemment de la capacité maximale *Vérification régulière de la pression de l'air comprimé afin de la maintenir toujours à 6 bars *Nettoyage régulier du Bypass
Séparateur	Filtrer la matière absorbée selon sa finesse	Microcoupure	*Problème réseau électrique	*Arrêt bref broyeur (selon la période de coupure)	Auto/Visuel	1	3	2	6	*Programmation d'un système de temporisation des coupures afin d'éviter l'arrêt immédiat d'un composant et éviter les redémarrages fréquents qui consomment beaucoup d'énergie

Élévateur Ciment	Elever le ciment vers le Silo	Problème de rotation (contrôle de rotation)	*Bourrage pied élévateur *Problème au niveau de la bande	*Arrêt broyeur *Rupture de la bande *Arrêt rotation tambour	Auto/Visuel	1	3	2	6	*Régulation du débit alimentant l'élévateur afin d'éviter les bourrages au niveau du pied élévateur *Prévoir un contrôle systématique du revêtement des deux tambours commande et renvoie
Redler	Transporte le ciment vers l'aéroglissière	Problème de rotation (contrôle rotation)	*Problème au niveau de la bande *Bourrage	*Arrêt broyeur	Auto/Visuel	1	2	1	2	*Fiabilité sonde de détection *Installation des SAS au dessus des Redller (Régulation du débit)
		Surveillance tension	*Bourrage matière	*Arrêt broyeur	Automatique	1	3	2	6	*Régulation du débit *Fiabilité sonde détection
Élévateur	Elever la matière d'alimentation du broyeur	Problèmes dans la chaîne (déport de bande/système de sécurité fin de course)	*Bourrage pied élévateur *Problèmes au niveau de la chaîne	*Arrêt alimentation broyeur	Auto/Visuel	1	1	2	2	*Régulation du débit alimentant l'élévateur afin d'éviter les bourrages au niveau du pied élévateur *Prévoir un contrôle systématique du revêtement des deux tourteaux commande et renvoie *Contrôle rupture de la chaine
Broyeur	Broyer la matière	Huile vérin	*Fuite d'huile vérin	*Arrêt broyeur en cas de grosse chute de pression	Visuel	1	3	1	6	*Changement systématique joints vérin *Visites systématiques pour contrôler le réservoir d'huile et l'étancheité des conduites
		Erreur signal niveau haut silo 5 (CPJ45)	*Détecteur défectueux	*Arrêt broyeur (absence de stockage)	Automatique	1	2	2	2	*Fiabilité détecteur
		Sonde contre pression	*Défaillance sonde de détection	*Arrêt broyeur	Automatique	1	3	2	6	*Fiabilité sonde de détection
Foyer sécheur	Produire les gaz chauds pour sécher la matière broyée	Température basse de la sortie broyeur	*Présence d'eau dans le Fuel *Humidite élevée matières ajout	*Arrêt broyeur par vibrations	Automatique	1	3	2	6	*Mise en place d'un système de préchauffage dans les trémies *Maintenir un niveau élevé réservoir fuel *Prévoir une purge d'eau du réservoir du fuel *Utilisation d'un fuel avec un bon PCI (9600 kcal/kg) *Stockage matières d'ajout en zone couverte pendant les temps humides

Pompe hydraulique	Montée et descente des galets maîtres	Arrêt local	*Niveau d'huile bas	*Arrêt broyeur	Auto/Visuel	1	2	1	2	*Visites systématiques pour contrôler le niveau d'huile
SAS	Alimente le broyeur avec de la matière	Coincement SAS	*Coincement par blocs de matière + corps étranger	*Arrêt alimentation broyeur	Automatique	1	1	2	2	*Fiabilité détecteur de métaux *Respect de la granulométrie éxigée
Bande BT1	Transporter les matières d'ajout	Problèmes divers (système de sécurité arrêt à câble)	*Bourrage matière blocs *Problèmes au niveau de la bande	*Arrêt alimentation broyeur *Rupture bande	Auto/Visuel	1	1	2	2	*Régulation du débit *Contôle régulier de la bande
Bande BT2	Transporter le Clinker et les matières d'ajout	Problème de rotation (contrôle de rotation)	*Bourrage *Problèmes au niveau de la bande	*Arrêt alimentation broyeur *Rupture bande	Auto/Visuel	1	1	2	2	*Régulation du débit *Contôle régulier de la bande
Bande BT5	Transporter la matière d'alimentation vers le broyeur	Problèmes dans la bande (déport de bande/système de sécurité fin de course)	*Bourrage *Problèmes au niveau de la bande	*Arrêt alimentation broyeur *Rupture bande	Auto/Visuel	1	1	2	2	*Régulation du débit *Contôle régulier de la bande

Tableau 11: Tableau AMDEC

Donc comme on peut le remarquer à partir du tableau AMDEC, on a répertorié chaque mode de défaillance de chaque sous-élément du broyeur ciment, ayant attribué une note de criticité à chaque défaillance à partir de la cotation du **Tableau 10**.

Nous remarquons que la plupart des défaillances présentent dans le 20/80 du Pareto ont une criticité haute ici dans l'analyse AMDEC, ce qui est plutôt logique du fait que ces arrêts ont une haute fréquence et durée d'arrêts cumulée importante.

NB : certains modes de défaillance peuvent ne pas concorder avec l'analyse Pareto du fait que dans l'AMDEC, on prend en compte aussi des facteurs de non détection et l'intervalle de temps étudiée.

Grâce à cela nous avons pu construire un histogramme des criticités afin de mettre en valeur le nombre de défaillances ayants une criticité non tolérable, pour cela nous avons choisis un seuil de criticité égal à 6 :

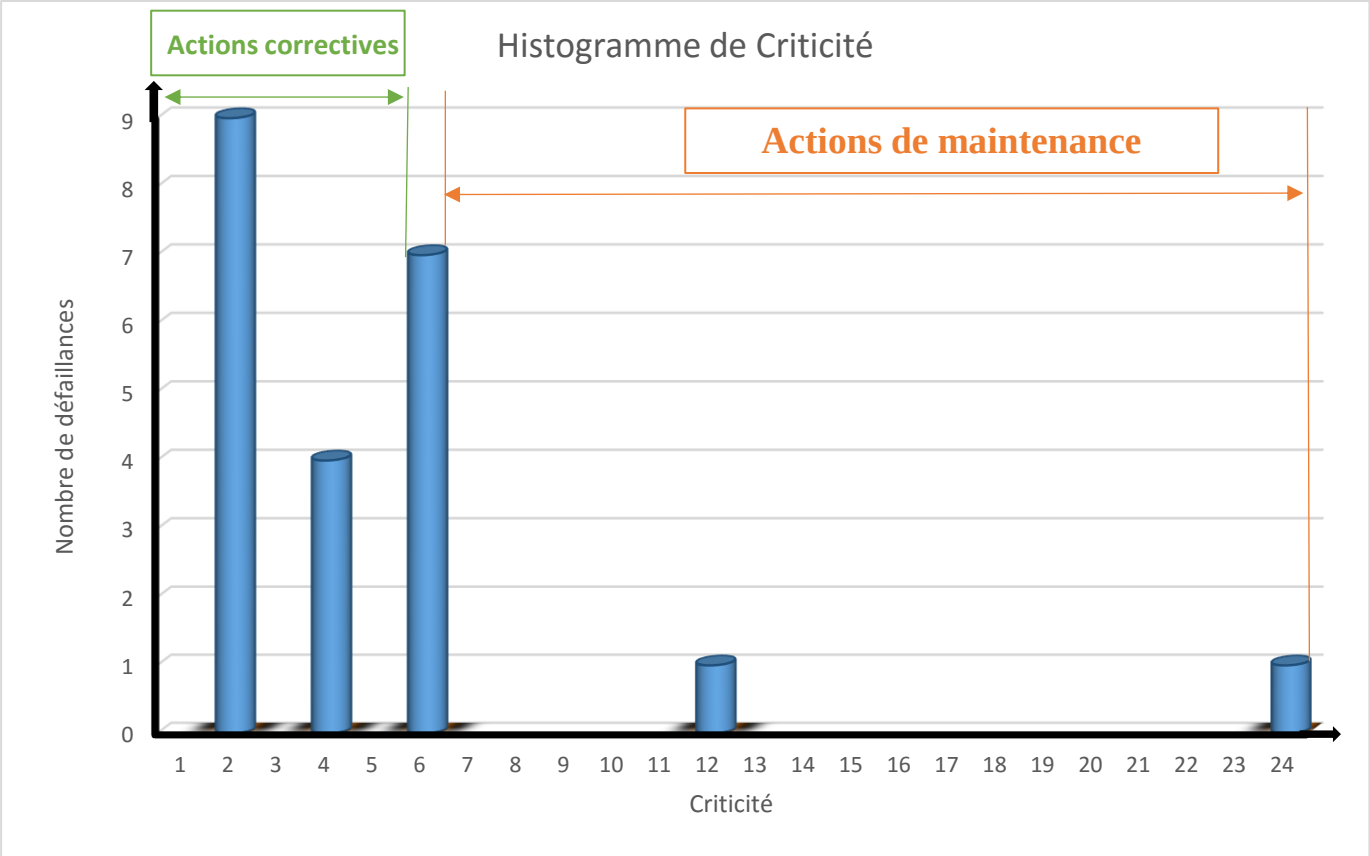


Figure 16: Histogramme de criticité

Donc nous mènerons des actions de maintenance pour les défaillances de criticité supérieure ou égale à 6.

3. Plan d'action [8]

D'après les actions que nous avons stipulées dans le tableau AMDEC, on va les répertorier dans un tableau qu'on appellera plan d'action comme suit :

Sous-élément	Mode de défaillance	Poste responsable	Action
Moteur	Vibrations	Production/ Maintenance électrique	*Prévoir l'installation de la nouvelle génération de réducteurs COPE drive (système d'entrainement munis de variateurs) *Contrôler régulièrement l'accouplement moteur
Moteur	Problème rotation	Maintenance électrique	*Contrôler la fiabilité du détecteur de rotation *Effectuer une maintenance systématique et préventive du moteur
Filtre process	Différence de pression	Maintenance électrique / Maintenance mécanique	*Contrôler régulièrement les manches *Contrôler la fiabilité du détecteur de rotation *Vérifier régulièrement la pression d'air afin de la maintenir entre 7,5 et 8 bars
Séparateur	Microcoupure	Maintenance électrique	*Installation d'onduleurs entre le réseau électrique et le matériel afin d'éviter l'arrêt immédiat d'un composant et éviter les redémarrages fréquents qui consomment beaucoup d'énergie
Elevateur ciment	Problème rotation	Production/ Maintenance mécanique	*Régulation du débit alimentant l'élévateur afin d'éviter les bourrages au niveau du pied élévateur *Prévoir un contrôle systématique du revêtement des deux tambours commande et renvoie
Redler	Différence de tension	Production/ Maintenance électrique	*Régulation du débit *Contrôler la fiabilité de la sonde détection
Broyeur	Fuite huile vérin	Maintenance mécanique	*Effectuer un changement systématique des joints vérin *Effectuer des visites systématiques pour contrôler le réservoir d'huile et l'étanchéité des conduites

Broyeur	Défaillance sonde contre pression	Maintenance électrique	*Contrôler la fiabilité sonde de détection
Foyer sécheur	Température basse sortie broyeur	Production/ Maintenance électrique	*Mettre en place d'un système de préchauffage dans les trémies *Maintenir un niveau élevé réservoir fuel *Prévoir une purge d'eau du réservoir du fuel *Utilisation d'un fuel avec un bon PCI (9600 kcal/kg) *Stockage matières d'ajout en zone couverte pendant les temps humides

Tableau 12: Plan d'action

Ce sont donc les actions qu'on propose aux différents services de l'entreprise pour les modes de défaillance les plus critiques.

L'application de ces actions permettra de résoudre la grande majorité des arrêts -à savoir les plus critiques- présents dans les 5 mois étudiés, ce qui représente théoriquement une baisse de 80% des arrêts, vu que notre plan d'action est destiné aux arrêts de haute criticité dans l'analyse AMDEC et que ceux-ci représentent une grande partie des pourcentages cumulés d'arrêts dans l'analyse Pareto comme mentionné avant.

La réduction de ces arrêts permettra d'améliorer le rendement du broyeur ciment BK4 :

- ✓ Moins d'arrêts est synonyme de plus de temps de marche et donc amélioration de l'intervalle de temps entre deux arrêts (MTBF).
- ✓ Moins de marches à vide causées par les arrêts et donc amélioration de la consommation énergétique.
- ✓ Un débit moyen de production plus stable et donc amélioration de la consommation énergétique, pour cause :

  Débit faible -> Plus de temps de broyage -> Plus de CES et CCS

  Débit haut -> Bourrage -> Arrêt -> Marche à vide -> Pertes énergétiques

Tout ceci engendrera une amélioration globale, soit dans la consommation énergétique soit dans le temps de marche, et c'est là, qu'on parle d'**OPTIMISATION**.

Conclusion

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

Durant notre période de stage, ayant pour but l'optimisation du broyeur ciment BK4, nous avons proposés des recommandations et solutions afin de réduire les pertes et d'améliorer l'efficacité énergétique en exploitant un ensemble d'outils à savoir le diagramme d'Ishikawa, le diagramme Pareto et l'analyse AMDEC afin d'atteindre notre objectif.

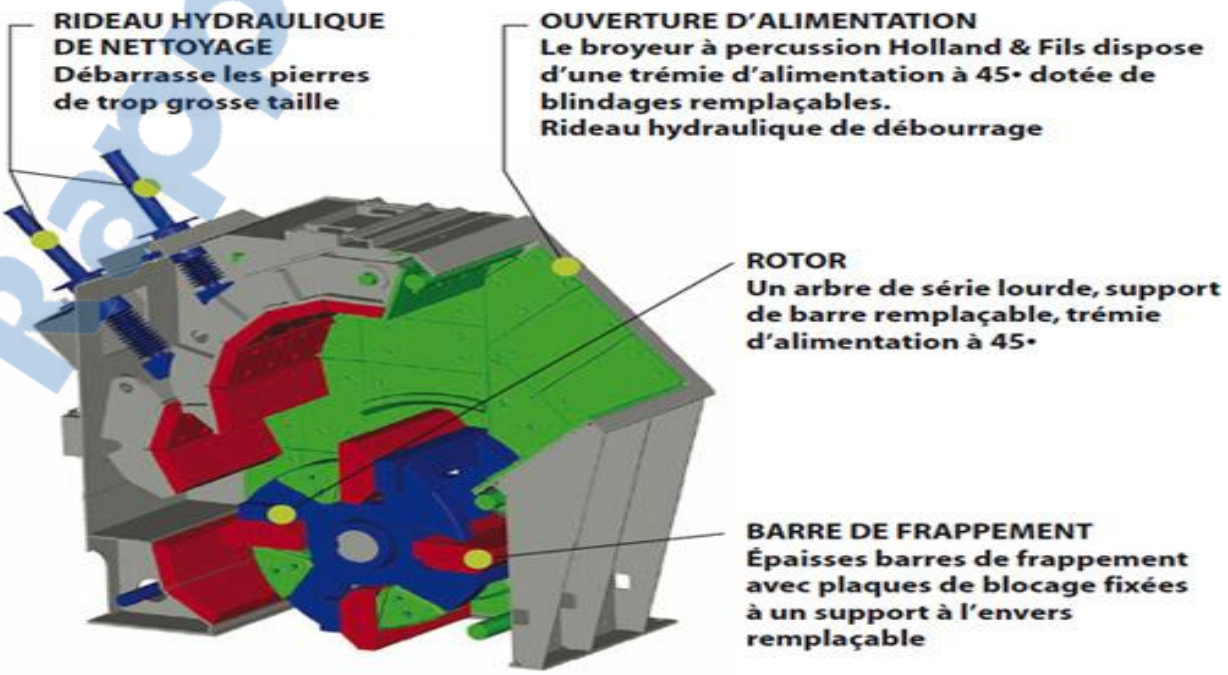
Tous les services que ce soit production, maintenance, électrique... doivent travailler en collaboration pour une bonne disponibilité du broyeur et par conséquent une bonne optimisation, pour cela nous proposons :

- Faire des check liste pour relever toutes les anomalies du système.
- Viser toujours à être proche de l'objectif en CES et CCS.
- Améliorer le MTBF du broyeur par un plan de maintenance préventive.

Finalement, nous jugeons que notre période de stage a été très bénéfique pour nous sur le plan professionnel et pratique, elle nous a permis de vivre les problèmes réels de l'industrie et nous espérons que notre modeste travail aura un apport pour la société.

ANNEXES

Organigramme de la société HOLCIM



Concasseur à marteaux

Rapport-Gratuit.com

Date	Débit 35	Débit 45	Débit 55	Débit moyen	CES TOTALE
01-mars	138	100	107	119	18,53
02-mars	0	116	112	115	32,29
03-mars	0	122	0	98	31,15
04-mars	0	123	0	123	33,83
05-mars	0	125	0	125	29
06-mars	0	111	0	111	31,47
07-mars	0	124	0	124	27,85
08-mars	128	141	115	101	27,78
09-mars	138	126	0	129	26,57
10-mars	0	127	0	127	26,35
11-mars	0	122	120	121	27,3
12-mars	0	124	119	124	27,01
13-mars	0	115	123	117	28,13
14-mars	0	126	0	126	26,7
15-mars	128	124	115,1	119	28,41
16-mars	131	122	0	123	26,59
17-mars	0	116	0	102	29,66
18-mars	123	117	0	119	28,11
19-mars	0	109	107	108	32,01
20-mars	0	116	0	116	30,79
21-mars	0	114	109	112	31,66
22-mars	122	0	105	116	30,75
23-mars	131	113	0	117	32,05
24-mars	113	106	0	107	33,7
25-mars	134	112	102	111	35,56
26-mars	0	111	103	109	35,58
27-mars	0	116	0	116	32,73
28-mars	0	108	0	108	30,06
29-mars	134	126	100	113	33
30-mars	130	120	0	123	32,66
31-mars	0	120	0	120	30,63

Tableau regroupant les débits des différentes qualités du ciment ainsi que le débit moyen et la CES journalière du mois de Mars 2015

(Données exploitées pour l'élaboration du diagramme la Figure 14)

Date	Equipement	Causes d'arrêts	Durée	Fréq.
4-janv.-15	Bande BT2	Contrôle de rotation	0,15	1
4-janv.-15	Moteur	Vibration	0,45	1
12-janv.-15	Moteur	Puissance	0,05	1
14-janv.-15	Bande BT1	Arrêt à câble	0,06	1
17-janv.-15	Filtre process	Différence de pression	3,5	1
18-janv.-15	Pompe hydro	Arrêt local	0,49	1
19-janv.-15	Pompe hydro	Arrêt local	0,45	1
21-janv.-15	Moteur	Puissance élevée	0,07	1
27-janv.-15	Bypass	Coincement bypass	0,1	1
27-janv.-15	Sas	Coincement sas	0,15	1
28-janv.-15	Filtre process	Différence de pression	1,2	1
29-janv.-15	Moteur	Vibration	0,04	1
30-janv.-15	Bypass	Coincement bypass	0,15	1
31-janv.-15	Bypass	Coincement bypass	0,1	1
31-janv.-15	Moteur	Disponibilité pompe graissage bras galets	0,25	1
6-févr.-15	Bypass	Coincement bypass	0,15	1
13-févr.-15	Bypass	Coincement bypass	0,1	1
13-févr.-15	Moteur	Vibration	0,05	1
15-févr.-15	Filtre process	Disponibilité filtre process	0,06	1
18-févr.-15	Moteur	Vibration	0,07	1
18-févr.-15	Moteur	Vibration	0,05	1
19-févr.-15	Moteur	Vibration	0,12	1
20-févr.-15	Moteur	Microcoupure	0,1	1
20-févr.-15	Moteur	Vibration	0,16	1
21-févr.-15	Filtre process	Différence de pression	0,2	1
22-févr.-15	Moteur	Vibration	0,07	1
27-févr.-15	Moteur	Vibration	0,07	1
28-févr.-15	Moteur	Vibration	0,07	1
3-mars-15	Broyeur	Fuite d'huile vérin	2	1
8-mars-15	Moteur	Contrôle de rotation	0,28	1
11-mars-15	Bande BT5	Déport de bande	0,1	1
16-mars-15	Moteur	Vibration	0,18	1
17-mars-15	Moteur	Contrôle de rotation moteur	0,92	2
19-mars-15	Moteur	Vibration	0,17	1
24-mars-15	Moteur	Contrôle de rotation moteur	0,85	3
1-avr.-15	Moteur	Vibration + Contrôle de rotation	0,29	1
2-avr.-15	Moteur	Vibration + Contrôle de rotation	1,05	1
3-avr.-15	Foyer sécheur	Température basse de sortie broyeur	1,25	1
4-avr.-15	Moteur	Vibration + Contrôle de rotation	2,36	1
5-avr.-15	Bypass	Coincement bypass	0,2	1
7-avr.-15	Moteur	Vibration + Contrôle de rotation	0,15	1
8-avr.-15	Séparateur	Microcoupure	4,1	1
9-avr.-15	Foyer sécheur	Température basse de sortie broyeur	2	1
10-avr.-15	Sas	Coincement sas	0,5	1
11-avr.-15	Moteur	Vibration	0,1	1
12-avr.-15	Moteur	Vibration	0,1	1
15-avr.-15	Elévateur	Déport de bande	0,1	1
16-avr.-15	Redler refus	Rotation	0,1	1
18-avr.-15	Elévateur	Déport de bande	0,5	1
20-avr.-15	Séparateur	Microcoupure	0,1	1
21-avr.-15	Elévateur	Déport de bande	0,1	1
22-avr.-15	Elévateur	Déport de bande	0,1	1
23-avr.-15	Broyeur	Défaut sonde contre pression	0,5	1
25-avr.-15	Bande BT5	Déport bande	0,45	1
26-avr.-15	Moteur	Vibration	0,2	2
27-avr.-15	Broyeur	Défaut sonde contre pression	1,35	1
2-mai-15	Redler refus	Surveillance tension	0,24	3
3-mai-15	Redler refus	Surveillance tension	1	5
4-mai-15	Redler refus	Surveillance tension	1	5
7-mai-15	Moteur	Vibration	0,1	2
13-mai-15	Filtre process	Différence de pression	0,7	1
18-mai-15	Moteur	Microcoupure	0,5	1
27-mai-15	Broyeur	Erreur signal niveau haut silo 5	0,1	1
27-mai-15	Moteur	Microcoupure	0,2	2
28-mai-15	Elévateur ciment	Contrôle de rotation	4,45	1

Rapport-gratuit.com
LE NUMERO 1 MONDIAL DU MEMOIRES

Tableau regroupant tous les arrêts ayant eu lieu entre le mois de Janvier et Mai 2015

(Données exploitées pour l'analyse multicritère et l'élaboration du diagramme Pareto)

Bibliographie

- **[1]** Rapports PFE et documentation fournis au sein de l'entreprise.
- **[2]** http://www.manager-go.com/gestion-de-projet/dossiers-methodes/elaborer-un-cdc (Elaboration d'un cahier de charges).
- **[3]** Flow-sheets fournis par les responsables salle de contrôle de Holcim-Ras ElMa.
- **[4]** 156 Loesche mills for cement raw material_F (page 8).
- **[5]** https://fr.wikipedia.org/wiki/Diagramme_de_causes_et_effets (Elaboration diagramme Ishikawa).
- **[6]** Mme. Ikram Tajri (Management de l'entreprise et Gestion de la qualité).
  Mr. Anas Chafii (Gestion de la maintenance).
- **[7]** Formation AMDEC réalisée le 19/05/2016 au sein de la société par notre encadrant.
- **[8]** http://www.ecoresponsabilite.ademe.fr/n/structurer-un-plan-d-actions/n:50
- Wikipédia