

Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention de la

## **Licence Sciences et Techniques**

### **Spécialité : Conception et Analyse Mécanique**

Titre

## **Optimisation de la consommation des compresseurs d'air comprimé DSD 171**

Lieu : LafargeHolcim

Ville d'implantation de l'entreprise : Fès

Présenté par :

- TIMEDOUNENE Yassine et KHARRAZ Mohcine

Encadré par :

- Pr. Bilal HARRAS l'encadrant de la faculté
- Mr. Driss MENKAL l'encadrant de la société ( superviseur du service de maintenance).

**Soutenu le 06/06/2018 devant le jury :**

- Pr. Bilal HARRAS
- Pr. Mohamed EL MAJDOUBI





## *Remerciements*

Au terme de la rédaction de ce rapport, c'est un devoir agréable d'exprimer en quelques lignes notre sentiment de reconnaissance que nous devons à tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail, qu'ils trouvent ici nos vifs respects et notre profonde gratitude.

Après ALLAH ...nous tenons à remercier vivement notre encadrant de la FST Pr. Bilal HARRAS d'avoir mis à notre disposition ses connaissances, ses expériences, et ses précieux conseils.

Nous voudrions également exprimer notre ample gratitude envers le jury, Pr Mohammed EL MAJDOUBI qui a bien voulu nous donner l'honneur d'évaluer et d'apprécier ce travail.

De même, nous remercions notre encadrant à la société LafargeHolcim, Monsieur Driss MENKAL, pour son suivi, ses orientations et son soutien au cours de ce stage.

Nous remercions aussi Monsieur Najib RIBI, le directeur de la cimenterie de Fès Ras El Ma, de nous avoir accueillis et nous a donné l'opportunité d'effectuer un stage au sein de la société, ainsi l'ensemble du personnel de la société qui nous ont apportés leurs aides tout au long de ce stage. Grâce à leur disponibilité et leur gentillesse, on a bénéficié de tous les éléments nécessaires au bon déroulement de notre stage.

Par la même occasion, nos remerciements vont aussi à Mr Youssef HATACH, Mr Nourdine BOURAZZAK et Mr CHAHAR, pour la disponibilité dont ils ont fait preuve durant le déroulement du projet.

Nous exprimons notre profonde gratitude à la direction de la faculté des sciences et techniques de Fès. Ainsi que tout le corps professoral et administratif pour ces années de formation enrichissantes.

## Résumé

Face à une population mondiale et un développement croissant, les besoins en produits cimentiers pour la construction des bâtiments et des infrastructures sont considérables. En effet, l'industrie cimentière est devenue l'une des activités industrielles les mieux structurées et les mieux répartie sur le royaume. Elle réalise, en moyenne 46% de la production et 50% de la valeur ajoutée du secteur « matériaux de construction ». Dans l'industrie cimentière, la diminution des coûts de la consommation d'air comprimé est devenue une préoccupation majeure pour réduire la facture énergétique du processus de fabrication du ciment.

L'objectif de ce projet est de proposer des solutions simples à coût minimal pour réduire la consommation d'énergie électrique des compresseurs d'air comprimé. Ce but ne peut pas être réalisé sauf s'il y a une bonne gestion des pièces de la machine c'est-à-dire le respect du plan de maintenance et aussi améliorer le conditionnement de la salle des compresseurs, puis lancer des campagnes de chasse aux fuites.

**Mots clés** : air comprimé, consommation électrique, filtre, chasse aux fuites, AMDEC, PARETO, ISHIKAWA, compresseur, ventilateurs, filtre process.



## Sommaire

Liste des figures : ..... 8

Liste des tableaux : ..... 9

### Chapitre I: présentation générale de l'organisme d'accueil

<b>I. Présentation de la société LafargeHolcim :</b> .....	12
<b>1. Présentation générale :</b> .....	12
<b>2. Présentation de HOLCIM MAROC :</b> .....	12
a)- Les activités de LafargeHolcim Maroc :.....	12
b)-Historique de LafargeHolcim Maroc : .....	13
<b>II. Présentation générale de LafargeHolcim de Fès :</b> .....	16
<b>1. fiche technique de l'entreprise :</b> .....	16
<b>2. organigramme de la société :</b> .....	17
<b>3. les différents services de LafargeHolcim Fès :</b> .....	18

### Chapitre II: le ciment et son procédé de fabrication

<b>I. Ciment :</b> .....	20
1. Définition: .....	20
2. Les principaux composants du ciment : .....	20
<b>3. les types du ciment :</b> .....	21
a) CPJ 35 :(Ciment Portland aux Ajouts 35).....	21
b) CPJ 45 :(Ciment Portland aux Ajouts 45).....	21
c) CPA55 : (Ciment Portland avec Ajouts 55) .....	22
<b>II. Procédé de fabrication du ciment :</b> .....	22
<b>1. Extraction :</b> .....	24
<b>2. Concassage :</b> .....	24
<b>3. Pré-homogénéisation :</b> .....	24
<b>4. Broyage et homogénéisation de la farine crue :</b> .....	25
a) Dosage cru : .....	25
b) Broyage cru : .....	25
c) Dépoussiérage : .....	25
d) Homogénéisation : .....	25
<b>5. Production et stockage du clinker :</b> .....	25
• Cuisson : .....	26
<b>6. Broyage du ciment :</b> .....	27



<b>7. Ensachage et expédition :</b> .....	28
a) Ensachage :.....	28
b) Expédition :.....	28

Chapitre III: présentation du sujet

<b>I. Notions généraux :</b> .....	30
1. L'air :.....	30
2. L'air comprimé :.....	31
3. Généralité sur les compresseurs :.....	32
➤ Définition :.....	32
➤ Classification des compresseurs :.....	32
<b>II. Les compresseurs à vis d'air comprimé :</b> .....	33
1. Les composants d'un compresseur à vis d'air comprimé :.....	33
2. Fonctionnement :.....	34
4. Caractéristiques techniques d'un compresseur KAESER DSD 171 :.....	34
a) Le compresseur :.....	34
b) Le moteur :.....	35
c) Condition d'utilisation :.....	35
d) Volume d'huile :.....	35
e) lubrification et graissage :.....	35
<b>III. Problématique :</b> .....	36

Chapitre IV: optimisation de la consommation des compresseurs DSD171

<b>I. Rationalisation de la consommation d'air comprimé :</b> .....	38
1. Conditionnement de la salle :.....	38
• Ventilation et filtration de la salle :.....	38
• Aménagement de la salle des compresseurs :.....	39
2. Suivi des consommateurs d'air comprimé :.....	40
<b>II. Etude des causes de défaillance :</b> .....	40
1. La méthode de Pareto :.....	40
2. Le diagramme d'ISHIKAWA :.....	43
4. Plan de maintenance préventive :.....	46
<b>III. Résultats et interprétations :</b> .....	47
1. Calcul du débit d'air et débit des fuites :.....	47
a) Calcul du débit d'air :.....	48



b) Calcul du débit des fuites : .....	48
<b>2. Suivi de la consommation électrique : .....</b>	<b>49</b>
<b>3. Interprétation : .....</b>	<b>51</b>
<b>4. Chasse aux fuites : .....</b>	<b>51</b>
<b>IV. Autres solutions : .....</b>	<b>52</b>
<i>Conclusion générale .....</i>	<i>54</i>
<i>Bibliographie.....</i>	<i>55</i>

## Liste des figures :

Figure 1 : organigramme de LafargeHolcim de Fès.....	16
Figure 2 : les composants du ciment.....	20
Figure 3 : les méthodes de fabrication du ciment.....	22
Figure 4 : le processus de fabrication du ciment.....	22
Figure 5 : le pourcentage des gazes dans l'air.....	29
Figure 6: schéma explicatif d'air comprimé.....	30
Figure 7 : la classification des compresseurs.....	32
Figure 8 : schéma des composants d'un compresseur à vis.....	32
Figure 9 : schéma d'installation de production d'air comprimé.....	33
Figure 10 : la porte de la salle des compresseurs.....	37
Figure 11 : schéma de la salle des compresseurs.....	37
Figure 11 : schéma des ventilateurs dans la salle des compresseurs.....	37
Figure 13 : l'orifice d'air dans la salle des compresseurs.....	38
Figure 14 : ventilateurs sous dimensionnés.....	38
Figure 15 : schéma(1) des consommateurs d'air comprimé.....	39
Figure 16 : schéma(2) des consommateurs d'air comprimé.....	39
Figure 17 : diagramme de Pareto.....	40
Figure 18 : manches avant l'usage.....	50
Figure 19 : manches détériorées.....	51
Figure 17 : refroidisseur colmaté.....	51
Figure 18 : soufflage avec l'air comprimé.....	51

## Liste des tableaux :

Tableau 1 : historique de la société Holcim Maroc.....	12
Tableau 2 : historique de la société Lafarge Maroc.....	13
Tableau 3 : fiche technique de l'entreprise.....	15
Tableau 4 : les services de LafargeHolcim de Fès.....	17
Tableau 5 : les compositions chimiques du ciment CPJ 35.....	20
Tableau 6 : les compositions chimiques du ciment CPJ 45.....	20
Tableau 7 : les compositions chimiques du ciment CPA55.....	21
Tableau 8 : les valeurs du facteur de correction.....	35
Tableau 9 : le classement des criticités des compresseurs DSD171.....	40
Tableau 10 : les actions correctives des défaillances.....	41
Tableau 11 : grille de l'échelle de gravité.....	44
Tableau 12 : grille de l'échelle de fréquence.....	44
Tableau 13 : grille de l'échelle de détection.....	44
Tableau 14 : grille de l'échelle de criticité.....	45
Tableau 15 : plan de maintenance préventive.....	46
Tableau 16 : instants de fonctionnement à vide.....	47
Tableau 17 : le bilan électrique.....	49

## Introduction générale :

La consommation du ciment au Maroc a connu une forte croissance au cours des dernières années, due essentiellement à la politique de développement du logement social, des infrastructures de base et à la reprise des grands investissements touristiques et industriels. Cette tendance de la consommation devrait se poursuivre pour passer du niveau actuel (350 Kg/habitant/an) à celui de la plupart des pays du bassin Méditerranéen (500 à 600 Kg/habitant/an).

L'industrie cimenterie est fortement consommatrice en énergie électrique et thermique, ainsi l'énergie représente 40% à 50% du prix de revient du ciment.

L'air comprimé représente 10 à 15% de la facture d'électricité en industrie.

Le coût de l'air comprimé utile dépend du type, de la puissance et du rapport marche en charge/marche à vide du (des) compresseur(s), du type et du fonctionnement des sècheurs et des purgeurs et bien sûr du prix de l'électricité.

### Répartition des coûts de l'air comprimé



Notre rapport est articulé autour de quatre chapitres :

- **le premier chapitre** présente la société où se déroule le stage.
- le deuxième chapitre sera réservé à quelques généralités concernant le ciment et la description de son procédé de fabrication.
- Le troisième chapitre aura pour objectif de donner des rappels sur quelques notions concernant l'air, l'air comprimé, les compresseurs et les compresseurs DSD171 et la problématique.
- Finalement, le dernier chapitre sera réservé pour l'optimisation de la consommation des compresseurs d'air comprimé DSD 171.



## **Chapitre I :**

« Présentation général de l'organisme  
d'accueil »



## I. Présentation de la société LafargeHolcim :

### 1. Présentation générale :

HOLCIM : HOL rappelle les origines du groupe « le village HOLDERBANK », et CIM symbolise l'activité du ciment.

HOLCIM est un groupe suisse fondée en 1912, c'est un acteur majeur au niveau mondial dans la production de ciment, granulats et béton. Le groupe est aujourd'hui présent sur les 5 continents dans près de 70 pays et emploie près de 90 000 personnes.

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.

L'objectif de l'entreprise : fabriquer de matériaux de construction qui répondent aux nouvelles exigences et contribuent à la qualité de vie, tout en préservant durablement l'environnement.

### 2. Présentation de HOLCIM MAROC :

Filiale de Holcim, l'un des leaders mondiaux du ciment, du béton et des granulats, Holcim Maroc est un groupe cimentier national présent sur le marché marocain depuis 1978, avec 470 collaboratrices et collaborateurs, produit des matériaux de construction pour les usages les plus variés, à ces produits s'ajoutent les supports techniques et logistiques adaptés aux besoins du client.

Aujourd'hui LafargeHolcim est présente dans différentes régions du Maroc et dispose d'une capacité annuelle de production de 3,9 millions de tonnes.

#### a)- Les activités de LafargeHolcim Maroc :

- **Ciment** : Holcim Maroc 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).
- **Béton** : Holcim Bétons, filiale à 100% de Holcim Maroc, est présente sur le marché de l'oriental, du centre et du centre-nord avec 10 centrales (Fès, Nador, Settat, deux à Rabat, deux à Tanger et trois à Casablanca). Holcim Bétons propose une gamme de bétons répondant aux attentes de ses clients (bétons normalisés et bétons spéciaux). Nous proposons également un éventail de services allant de livraison au pompage ainsi que l'assistance technique dans le choix du béton, le dimensionnement et la mise en œuvre.

- **Granulats** : l'activité granulats a démarré en 2002 avec la création de la filiale Holcim Granulats qui exploite une carrière dans la région de BEN SLIMANE.
- **Géo-cycle** : la plateforme de prétraitement de déchets Ecoval a démarré ses activités en Juin 2007 dans la région d'EL GARRA à 40km de Casablanca. Filiale à 100% de LafargeHolcim Maroc, elle comprend différents ateliers de prétraitement et reconditionnement des déchets industriels en fonction de leurs caractéristiques et de leur nature.
- **BATIPRO, Distribution des matériaux de construction** : œuvrent pour la modernisation des circuits de distribution des matériaux de construction, LafargeHolcim Maroc a initié le premier réseau de distribution des matériaux de construction sous l'enseigne « BATIPRO Distribution ». A travers ce réseau, qui prône le professionnalisme, la qualité et la transparence. LafargeHolcim Maroc souhaite fédérer des distributeurs indépendants de divers horizons autour d'un même idéal et leur faire partager les mêmes bonnes pratiques commerciales au bénéfice de l'amélioration de leur compétitivité et pour une meilleure satisfaction de leur clientèle. L'ambition de BATIPRO Distribution est d'être le premier réseau de référence dans ce secteur d'activité.

### b)-Historique de LafageHolcim Maroc :

Année	Evénements
1976	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Création par l'Office de Développement Industriel (ODI) de la société CIOR, pour la réalisation d'une cimenterie dans la région d'Oujda.</li> </ul>
1978	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en service de l'usine d'Oujda qui démarre avec une capacité de production de 1,2 millions de tonnes par an.</li> </ul>
1979	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installation à Fès Doukkarat d'un centre d'ensachage de distribution d'une capacité de 500 000 tonnes par an, transformé en centre de broyage en clinker en 1989.</li> </ul>
1982	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mise en service du centre d'ensachage et de distribution d'une capacité de 350 000 tonnes.</li> </ul>
1990	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installation d'un centre de broyage à Fès RAS EL MA d'une capacité de 350 000 tonnes par an.</li> <li>• Création de la société HOLCIM Béton, afin de porter le développement de l'activité BPE de Holcim Maroc</li> </ul>



1992	<ul style="list-style-type: none"><li>• Changement de dénomination de la société CIOR qui devient Ciments de l'oriental</li></ul>
1993	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mise en service d'une ligne complète de production de clinker à Fès RAS EL MA.</li></ul>
1997	<ul style="list-style-type: none"><li>• Installation d'une centrale à béton à Rabat et à Casablanca.</li></ul>
2000	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mise en service des installations de valorisation de combustibles des substitutions à l'usine des Fès RAS EL MA, d'une troisième centrale à béton à Casablanca et d'une autre à Nador.</li></ul>
2001	<ul style="list-style-type: none"><li>• Certification ISO 9001 et ISO 14001 de la cimenterie de Fès.</li></ul>
2002	<ul style="list-style-type: none"><li>• Changement de l'identité visuelle : la société Ciment de l'orientale devient Holcim Maroc.</li><li>• Certification ISO 9001 et ISO 14001 de la cimenterie d'Oujda</li></ul>
2004	<ul style="list-style-type: none"><li>• Extension de la capacité de broyage et stockage du ciment à Fès RAS EL MA.</li></ul>
2006	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mise en service du broyage de Settât.</li></ul>
2007	<ul style="list-style-type: none"><li>• Entrée en production de l'usine de Settât avec une capacité de production 1,7 millions de tonnes de ciments.</li></ul>
2008	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lancement du projet de doublement de l'usine de Fès pour une capacité totale de 1,2 millions tonnes à horizon 2012.</li><li>• Certification ISO 9001 et ISO 14001 du centre de Nador.</li></ul>
2009	<ul style="list-style-type: none"><li>• Création du premier réseau de distribution des matériaux de construction au Maroc : Batipro Distribution avec un réseau de plus de 100 franchisés travers le Maroc</li></ul>
2010	<ul style="list-style-type: none"><li>• Certification ISO 9001 et ISO 14001 du centre de distribution de Casablanca, de la cimenterie de Settât et de la plateforme de traitement de déchets d'Ecoval à EL GARA</li></ul>
2012	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mise en service de la nouvelle capacité de production de l'usine de Fès. Le réseau BATIPRO atteint les 215 franchisés à fin 2012</li></ul>



2013	<ul style="list-style-type: none"><li>Mise en arrêt d'une des deux lignes de cuisson de l'usine d'Oujda en mai 2013 en raison d'un ralentissement de la demande au niveau national.</li></ul>
2014	<ul style="list-style-type: none"><li>Accord de fusion entre Lafarge et Holcim</li></ul>
2016	<ul style="list-style-type: none"><li>Fusion entre Lafarge et Holcim</li></ul>

TABLEAU 1 : HISTORIQUE DE LA SOCIÉTÉ HOLCIM MAROC

2001	<ul style="list-style-type: none"><li>Signature d'une convention d'investissement avec le gouvernement de 2,3 milliards de dirhams. Pose de la première pierre pour le lancement de la construction de la nouvelle cimenterie de Tétouan.</li></ul>
Mai 2004	<ul style="list-style-type: none"><li>Inauguration de la nouvelle cimenterie de Tétouan, dont le démarrage remonte à Septembre 2003</li></ul>
Juin 2004	<ul style="list-style-type: none"><li>Démarrage de l'unité de chaux de Tétouan</li></ul>
2006	<ul style="list-style-type: none"><li>Lancement du projet d'investissement pour la modernisation de l'unité de Tanger</li></ul>
Septembre 2006	<ul style="list-style-type: none"><li>Inauguration de l'usine de plâtres de Safi suite à son réaménagement.</li></ul>
Décembre 2006	<ul style="list-style-type: none"><li>Inauguration officielle de la nouvelle ligne de production de Bouskoura</li></ul>
Février 2007	<ul style="list-style-type: none"><li>Signature du contrat entre Lafarge Ciments et Kawasaki pour la réalisation de la deuxième ligne de cuisson de la cimenterie de Tétouan</li></ul>

TABLEAU 2 : HISTORIQUE DE LA SOCIÉTÉ LAFARGE

## II. Présentation générale de LafargeHolcim de Fès :

La cimenterie de Fès est située dans la localité de RAS EL MA à 20 km de l'ouest de la ville de Fès sur un terrain en propriété de la CIOR et à 340 km du port de Nador à partir duquel elle est alimentée en coke de pétrole. La liaison routière avec les autres régions du Royaume se fait à partir de l'autoroute reliant Casablanca et Oujda. L'usine est raccordée à la voie ferrée depuis 2005.

L'usine de Fès utilise le procédé de fabrication à voie sèche intégrale avec une capacité annuelle de 2 millions de tonnes, il comporte des ateliers de : concassage, broyage, stockage de la farine, cuisson, stockage du clinker, broyage des combustibles, broyage du ciment, ensachage et expédition du ciment.

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

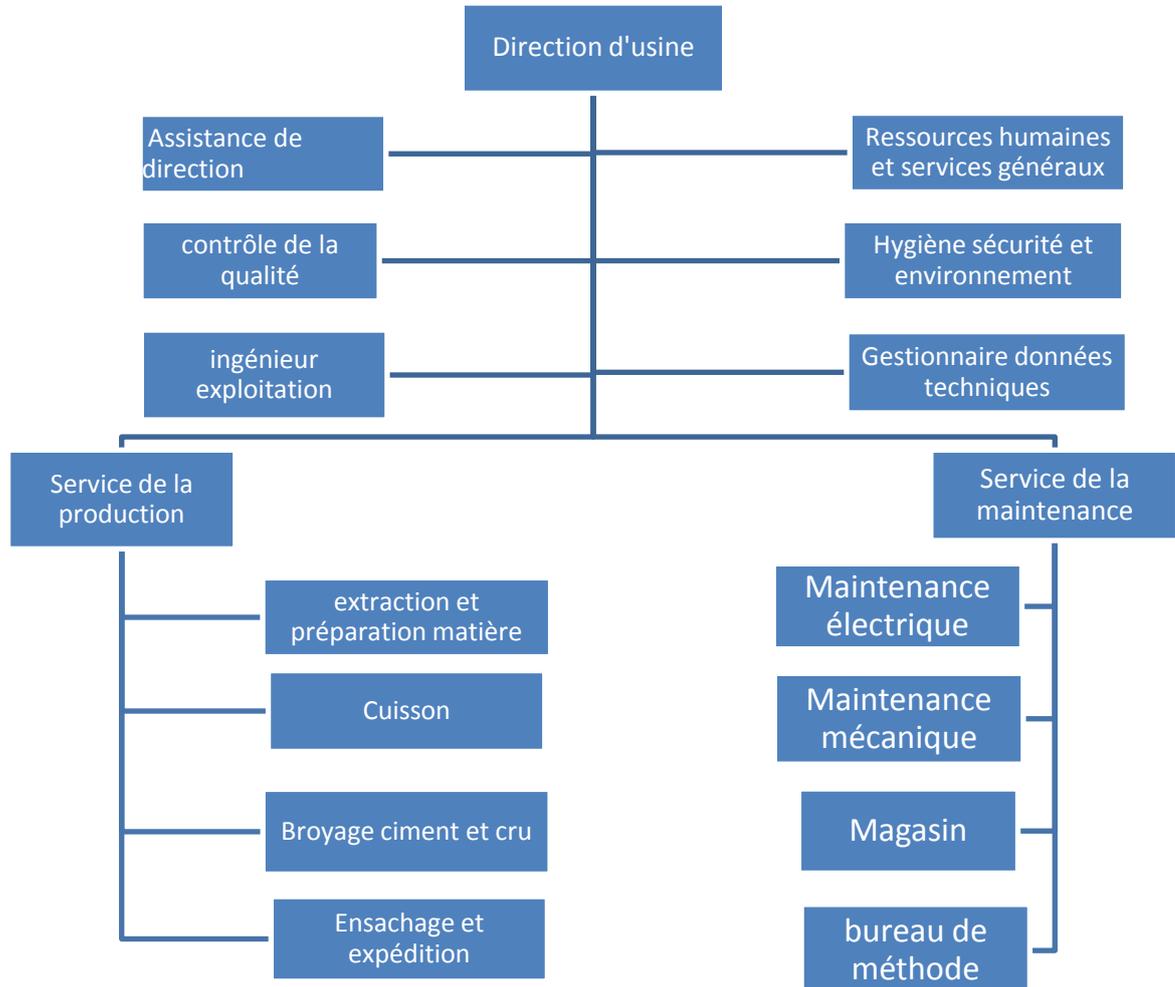
La cimenterie de Fès est dotée des certificats de conformité aux normes ISO 9001 version 2008 de la gestion de la qualité, ainsi que la norme relative au management environnemental ISO 14001 version 2004.

### 1. fiche technique de l'entreprise :

Raison social	LafargeHolcim Maroc
Forme juridique	Société anonyme de droit privé marocain
Date de création	1976
Activité principale	Production et commercialisation du ciment portland
Capacité social	421 000 000 DH
Capacité de production	2 000 000 tonnes/an
Effectif	200 personnes et sous-traitants

TABLEAU 3 : FICHE TECHNIQUE DE L'ENTREPRISE

## 2. organigramme de la société :



*Figure1 : organigramme de LafargeHolcim de Fès*

### 3. les différents services de LafargeHolcim Fès :

Service	Activités
contrôle et qualité	Organisation assurée par un laboratoire de qualité pour améliorer les produits et réduire les risques de mise en marche de produits défectueux.
Sécurité et environnement	Chargée d'assurer une qualité des ciments, du béton et des granulats, répondant aux meilleurs standards internationaux.
Exploitation	Mettre en œuvre la stratégie opérationnelle de la société y compris la gestion technique et commerciale (gestion des achats et gestion des stocks).
Ressources humains	Recrutements assurance maladie, gestion des congés, paie de personnel, et la gestion de la formation.
Production	Service d'accueil divisé en 3 secteurs :  Secteur 1 et 2 : concassage, broyage et cuisson des MP pour préparer le clinker.  Secteur 3 : chargé du broyage ciment et expédition.
Maintenance	Assurer la disponibilité des machines, pour produire dans les meilleures conditions de qualité, sécurité et cout.

Tableau 4 : les services de LafargeHolcim Fès

## Chapitre II :

« Le ciment et son procédé de fabrication »



## I. Ciment :

### 1. Définition:

Le ciment est un produit moulu issu du refroidissement du clinker qui contient un mélange de silicates et d'aluminates de calcium porté à 1450-1500 °C, température de fusion.

Le ciment usuel est aussi appelé liant hydraulique, car il a la propriété de s'hydrater et de durcir en présence d'eau. Cette hydratation transforme la pâte liante, qui a une consistance de départ plus ou moins fluide, en un solide pratiquement insoluble dans l'eau. Ce durcissement est dû à l'hydratation de certains composés minéraux, notamment des silicates et des aluminates de calcium.

L'expression de « pâte » de ciment durcissant sera utilisée pour désigner la pâte de ciment dans la transformation d'un état plus ou moins fluide en un état solide.

### 2. Les principaux composants du ciment :

- ✓ le clinker : produit obtenu par la cuisson du mélange : Calcaire+ Sable + Schiste+Minerai de fer. Il est constitué principalement d'oxydes métalliques, notamment :
  - la silice ( $SiO_2$ ) : 17 à 25 %
  - l'alumine ( $Al_2O_3$ ) : 3 à 6%
  - la chaux ( $CaO$ ) : 54 à 65%
  - l'oxyde de fer ( $Fe_2O_3$ ) : 2 à 5%

Suivant leur type, les ciments courants peuvent contenir autres constituants :

- ✓ les cendres volantes : produits résultant de la combustion des houilles et lignites dans les centrales thermiques.
- ✓ Les pouzzolanes : produits d'origine volcanique.
- ✓ Les ajouts chimiques de fabrication : sulfate de calcium (gypse), agents de mouture..

Ces ajouts possèdent :

- ✚ Des propriétés hydrauliques : par hydratation se forment des microcristaux fibreux stables et enchevêtrés dont résulte une cohésion progressive.
- ✚ Des propriétés pouzzolaniques : faculté de fixer le  $Ca(OH_2)$  pour donner naissance à des composés hydrauliques stables.
- ✚ Des propriétés physiques : maniabilité, compacité...

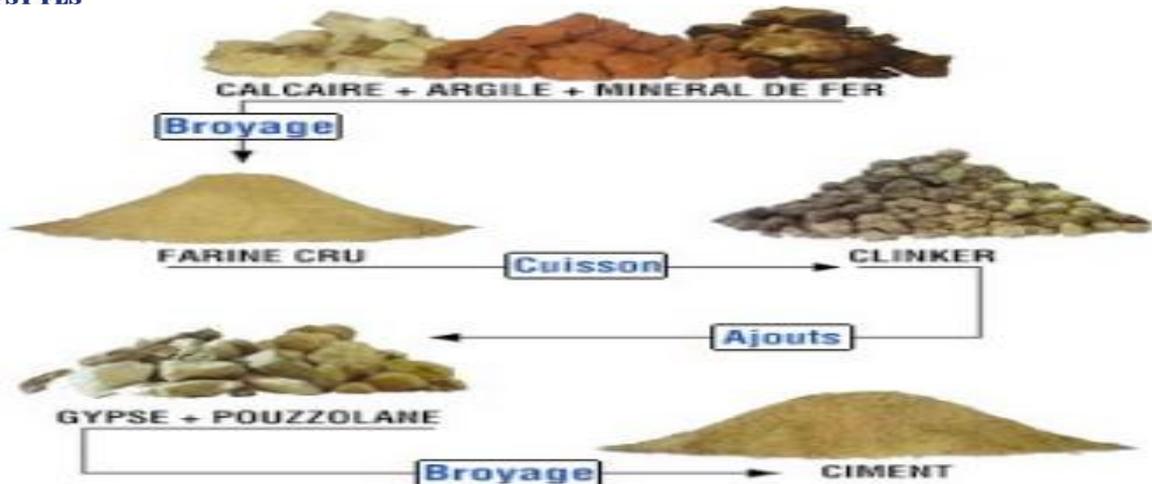


Figure 2 : les composants du ciment

### 3. les types du ciment :

#### a) CPJ 35 :(Ciment Portland aux Ajouts 35)

Le ciment CPJ 35 est un produit particulièrement adapté à la fabrication des mortiers et enduits pour la maçonnerie ainsi que des bétons non armés peu sollicités et à résistances mécaniques peu élevée . Les principaux constituants sont le clinker, le calcaire et le gypse.

Composants chimiques	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	CaO	MgO	$K_2O$	$SO_3$
%	12,8	3,54	2,23	65,63	0,96	0,61	3,04

Tableau 5 : compositions chimiques du ciment CPJ 35

#### b) CPJ 45 :(Ciment Portland aux Ajouts 45)

Le ciment CPJ 45 est un ciment portland dont les constituants principaux sont le clinker, le calcaire, le gypse et la pouzzolane. La classe de résistance de 45 MPa lui confère l'aptitude à être utilisé pour les bétons armés fortement sollicités et à résistances mécaniques élevées.

Les résistances mécaniques élevées à jeune âge du CPJ 45 permettent d'obtenir un décoffrage rapide des éléments de structure et des produits préfabriqués.

Composants chimiques	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	CaO	MgO	$K_2O$	$SO_3$
%	13,96	3,83	2,42	64,89	1,07	0,6	2,92

Tableau 6 : compositions chimiques du ciment CPJ 45

### c) CPA55 : (Ciment Portland avec Ajouts 55)

Le ciment CPA 55 est un ciment portland artificiel composé de clinker, calcaire, gypse, pouzzolane et les cendres volantes.

La 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. Le CPA 55 est adapté aux applications de la préfabrication nécessitant un décoffrage rapide et un durcissement accéléré.

Composants Chimiques	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	CaO	MgO	$K_2O$	$SO_3$
%	15,24	4,08	2,74	64,75	1,01	0,63	3,07

Tableau 7 : compositions chimiques du ciment CPJ 55

## II. Procédé de fabrication du ciment :

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

Le ciment est généralement fabriqué en cuisant vers 1450 °C des mélanges de calcaire, d'argile (ou bien le sable et le schiste). On obtient alors des nodules durs, appelés clinker.

Ce clinker constitue la matière première du ciment, pour y aboutir il faut broyer le clinker avec un peu de gypse selon le type de ciment souhaité, le ciment, produit et stocké dans des silos, passe à la dernière étape de fabrication, il s'agit de l'ensachage avant d'être expédié dans des sacs ou en vrac selon le besoin du client.

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 farine crue.
- Production du clinker.
- Broyage du ciment.
- Ensachage et expédition du ciment.

Il existe quatre méthodes de fabrication du ciment qui dépendent essentiellement du matériau :

-  Fabrication du ciment par voie humide (la plus ancienne).

- ✚ Fabrication du ciment par voie semi-humide (en partant de la voie humide).
- ✚ Fabrication du ciment par voie sèche (la plus utilisée).
- ✚ Fabrication du ciment par voie semi sèche (en partant de la voie sèche).

	Matières premières	Traitement	Cuisson
<b>Voie humide et (semi humide)</b>	Tendes, riches en eau, facilement délayables et peu apte au séchage.	Obtention d'une pâte bien dosée, homogène et d'une fluidité désirée.	Dans un four rotatif assez long ; vu la quantité d'eau à évaporée.
<b>Voie sèche et semi sèche</b>	Dures, pauvres en eau, aptes au broyage et au séchage.	Obtention d'une poudre sèche, bien dosée et de finesse désirée, (Eventuellement humide fiée pour la voie semi sèche).	Dans un four rotatif plus court, précédé d'un dispositif de pré chauffage des matières par les gaz chauds issus du four rotatif.

Figure 3 : les méthodes de fabrication du ciment

Le schéma de la figure résume le processus de fabrication du ciment de la carrière à l'expédition:

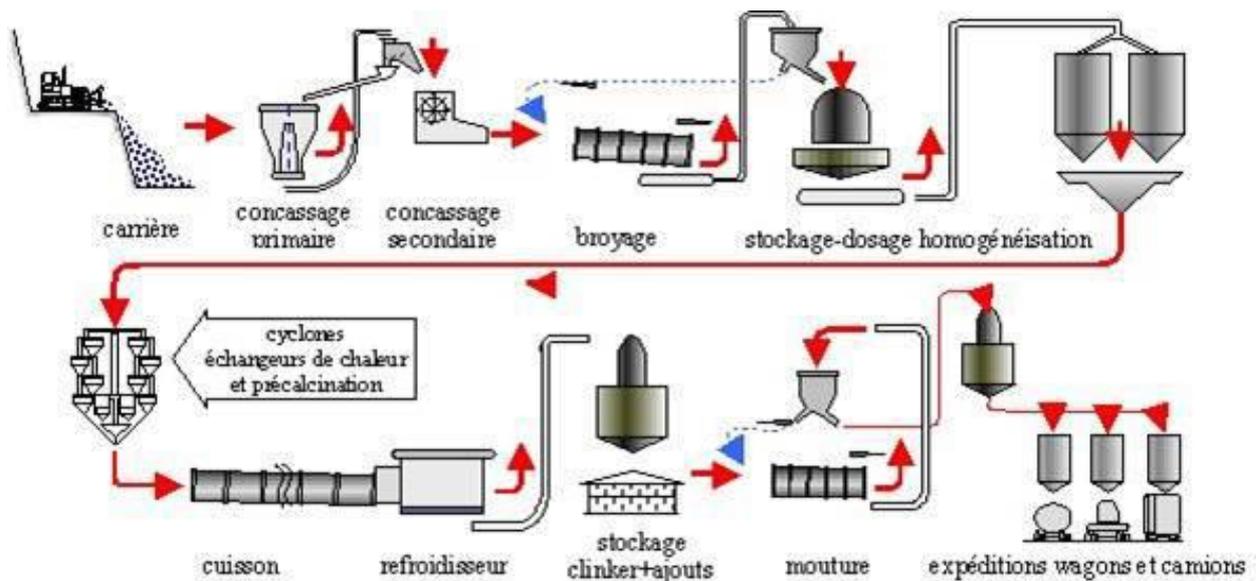


Figure 4: processus de fabrication du ciment

## 1. Extraction :

La carrière en cimenterie constitue la source en matières premières qui subissent des transformations pour fabriquer le produit fini, le ciment est alors fabriqué à partir de quatre composantes chimiques : carbonate de calcium, alumine, silice et oxyde de fer, et sont généralement des calcaires et des schistes. Elles sont extraites au niveau de la carrière à proximité de l'usine à ciel ouvert sous forme de blocs de dimensions très variées par abattage en grande masse, au moyen d'explosifs.

Les autres matières premières : Fluorine, Minerai de fer et le sable, sont extraites d'autres carrières et sont transportés jusqu'à l'usine pour être stockés.

## 2. Concassage :

L'atelier de concassage est situé à 50 m de la carrière calcaire. Il comprend un concasseur à double rotor, qui convient pour le concassage des matières friables ou demi-dures.

Toutes les matières premières et les ajouts (à part les cendres volantes) sont concassés séparément pour assurer les stocks nécessaires à la marche du broyeur cru et des broyeurs à ciment. La marche du concasseur est entièrement automatisée, lui confèrent un fonctionnement optimum et très sécurisé.

Le concasseur de débit 1500t/h peut concasser des blocs de dimension maximales 1,3m.

## 3. Pré-homogénéisation :

La pré-homogénéisation est une opération qui a pour but d'avoir un mélange avec une composition chimique régulière des matières premières.

Les matières extraites de la carrière (calcaire et argile), puis concassées doivent être soigneusement mélangées. Pour cela, elles sont mises en dépôt au moyen d'un stacker qui permet de mettre ces matières dans la bonne proportion (78% calcaire et 22% d'argile ou schiste), par couches successives, ce qui donne un lit (tas) de pré-homogénéisation.

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 (le contrôle par un PGNA : analyse instantané par activation neutronique). Les résultats de ces analyses permettent de définir par les correcteurs les modifications nécessaires à apporter au mélange des matières premières.



#### 4. Broyage et homogénéisation de la farine crue :

##### a) Dosage cru :

Cette étape consiste à déterminer et réaliser un pré dosage des quatre constituants de base du clinker. Pour cela, il existe quatre trémies assurant le stockage des matières premières.

##### b) Broyage cru :

Le broyage des matières est une opération qui a pour but de préparer un mélange homogène avec une bonne répartition granulométrique pour assurer les meilleures conditions de cuisson de la farine. À l'intérieur du broyeur cru, la matière subit des actions mécaniques par quatre galets qui écrasent les morceaux sur une assiette pour l'obtention de la farine, et les particules trop lourdes retombent sous plateau de broyage dans un élévateur à godets qui les recyclent dans le broyeur, les particules fines entraînées par le flux de gaz sont dirigées vers le séparateur monté sur le broyeur.

##### c) Dépoussiérage :

Une fois la matière broyée, les particules fines sont entraînées par le flux gazeux. Pour cela on dispose des filtres à manche qui libèrent la matière des gazes, cette opération de dépoussiérage s'effectue avec un rendement de 99,8%. En outre, cette opération est presque utilisée dans toutes les unités de production.

- Remarque : les gazes chaudes sont introduites dans le broyeur à une température moyenne de 200°C, à cette température la matière crue (entre à 20°C) subit une évaporation de l'eau libre et une perte de l'eau physiquement adsorbée.

##### d) Homogénéisation :

La farine produite est transportée à travers des aéroglisteurs vers un silo de stockage pour homogénéiser cette farine. Ce silo qui a une capacité de 6000 tonnes, est équipé d'un système de fluidisation.

#### 5. Production et stockage 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 :

- 1- Le séchage et le préchauffage de la farine crue.
- 2- La décarbonatation partielle de la farine crue.
- 3- La clinkérisation.



EST FES

#### 4- Le refroidissement du clinker.

##### ✚ Cuisson :

La cuisson s'effectue selon le procédé de la voie sèche intégrale. La ligne de cuisson est constituée de :

- une tour de préchauffage chacun à cinq étages de cyclones dite aussi tour DOPOL.
- Un refroidisseur à grilles.
- Un four rotatif

##### i) la tour de préchauffage :

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 gazes d'exhaure du four.

Un système de canons à air est installé dans des différents points du préchauffeur afin d'éviter le colmatage des dépôts éventuels de la matière.

##### ii) Le four rotatif :

Le four est un réacteur en forme de tube rotatif incliné de 3%, de diamètre égal à 3,8m, de 62m de longueur utile et dont de 3,8 m de diamètre, de 62 m de longueur utile et dont la vitesse de rotation peut atteindre 4,5 tr/mn et d'un débit nominal de 2800 tonne/jour. Le chauffage est assuré par une flamme au charbon installé à l'autre extrémité du four. La farine provenant de la tour de préchauffage déjà décarbonatée à 90%, poursuit son parcours dans le four et y entre à 1000°C environ, est chauffé jusqu'à la température de frittage ou clinkérisation de 1450°C. Dès lors les minéraux qu'elle contient, réagissent pour donner des nouvelles combinaisons minéralogiques principalement des silicates et des aluminates de calcium : le clinker.

On distingue trois zones au sein du four :

- La zone de décarbonatation (appelé aussi zone de transition) : c'est la zone à l'entrée du four, qui correspond à la phase de déshydratation de la farine crue, c'est à ce niveau où il ya un passage de la farine de son état liquide à l'état solide.

- La zone de cuisson : c'est la zone la plus importante et la plus chaude du four. En effet, la température de cette zone peut dépasser 1500°C, ce qui permet la combinaison de  $(CaO)_2 SiO_2$  (ou  $C_2S$ ) avec la chaux libre pour donner les cristaux de  $(CaO)_3 SiO_2$  (ou  $C_3S$ ).
- La zone de clinkérisation: les cristaux issus de la zone de cuisson poursuivent leur chemin et grossissent et granulent, formant ainsi du clinker. La chaleur nécessaire pour la réalisation de ces réactions est assurée par la combustion du coke de pétrole. La rotation et l'inclinaison du four permettent la progression de la matière.

iii) Le refroidisseur à grilles :

Le clinker sortant du four passe sur la grille vibrante du refroidisseur où il est trempé rapidement par l'air froid soufflé par le bas de la grille. Ce processus permet la récupération de la chaleur du clinker. L'air chaud généré est réintroduit dans le four pour aider à la combustion. Les refroidisseurs permettent aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention et le stockage. Il existe autres types de refroidisseurs : refroidisseurs rotatifs, planétaires, ...

Le clinker sortant du refroidisseur est transporté vers un silo métallique de 50000tonnes, équipé de trois casques d'extraction et d'un transporteur à godets et à chaînes.

Le stockage du clinker d'une part, confère à l'atelier de broyage ciment une autonomie de marche en cas d'arrêt intempestif du four et d'autre part, prémunissent le clinker d'une dégradation physicochimique que causerait un stockage prolongé à l'air libre.

## 6. Broyage du ciment :

À la fin de la cuisson, le clinker se présente sous forme de grains d'un diamètre compris entre 5m à 40m a, ce dernier et les ajouts (gypse et pouzzolane) sont introduits au niveau d'un broyeur vertical à galets, dans des proportions finies pour subir des efforts mécaniques du broyage et produire ainsi le ciment dont la finesse évolue de 2800 à 4000 $cm^2$  /g.

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

Les caractéristiques de différentes lignes de gamme de ciment obtenues sont conformes 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.

## 7. Ensachage et expédition :

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 livraison en vrac.

### a) Ensachage :

L'ensachage du ciment se fait par fluidisation à l'aide de supprimeurs au niveau des silos de stockage. Le ciment est ensuite transporté par des aéroglisteurs et des élévateurs à godets puis passe dans des cribles pour l'élimination des corps. L'installation d'ensachage a été rénovée récemment et comporte trois ensacheuses automatiques.

### b) Expédition :

L'expédition des différents types de ciment se fait en sacs de 50 Kg et en vrac soit par route soit par voie ferrée. Le chargement du ciment en vrac par camion ou wagons citernes se fait directement à partir des silos de stockage.

L'usine de LafargeHolcim Fès possède en plus des équipements cités ci-dessus, d'un broyeur de coke de pétrole qui réduit la dimension des blocs du combustible. C'est un broyeur à boulets, dont le principe de fonctionnement est le suivant :

Des doublets sont placés avec le produit dans le tambour rotatif. Le broyage résulte du frottement et du choc créés par la chute des boulets contre le combustible et par la collision des particules entre elles. L'intensité du broyage dépend principalement du régime du tambour, de la taille et de la matière des boulets ainsi que la durée du séjour du combustible dans le broyeur.

## **Chapitre III :**

### **« Présentation du sujet »**

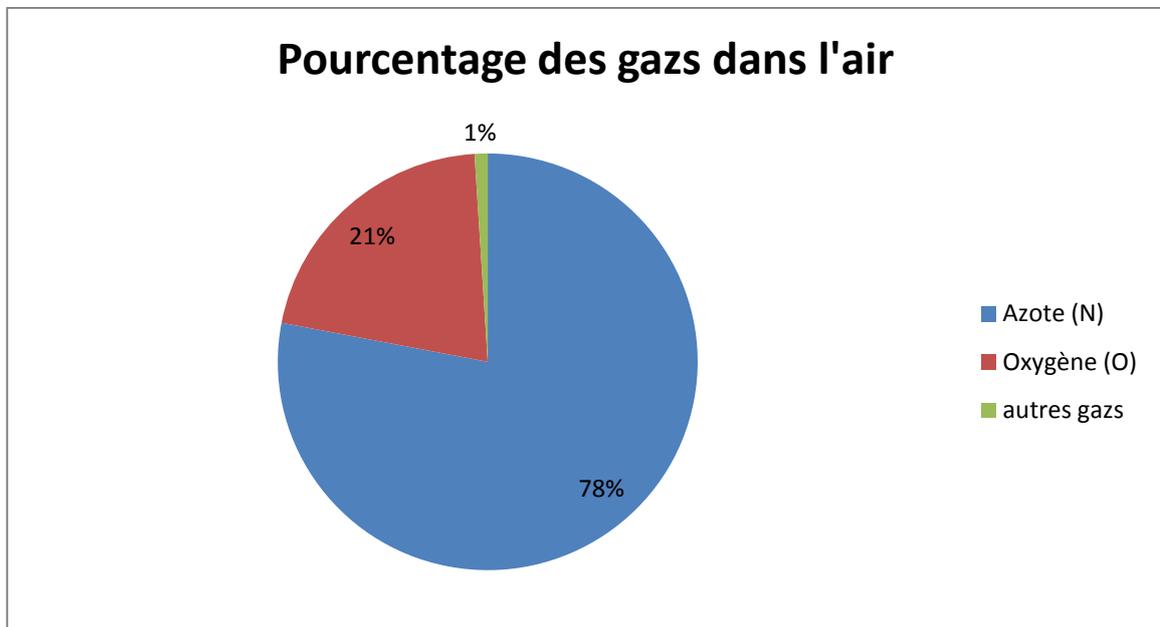
## Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques notions sur l'air comprimé, et les mécanismes du compresseur, ses composants, son fonctionnement, son rôle et ses caractéristiques techniques. Ensuite, nous avons présenté la problématique du sujet.

### I. Notions généraux :

#### 1. L'air :

- C'est un fluide gazeux qui forme l'atmosphère.



*Figure 5 : pourcentage des gaz dans l'air*

- L'atmosphère :

C'est une enveloppe gazeuse de la terre. Au fur et à mesure que l'on s'élève ou dessus du sol elle se raréfie et vers 1000 Km d'altitude, les atomes ou les molécules peuvent s'échapper : c'est l'exosphère. [1]

- La pression atmosphérique :

A la surface terrestre, l'air pèse approximativement  $1,2 \text{ kg/m}^3$ . Cela signifie que la surface terrestre et tous les objets qui se trouvent dessus sont soumis à une pression appelée pression de l'air ou pression atmosphérique.

Cette pression correspond au poids d'une colonne d'air mesurant  $1 \text{ cm}^2$  à la base et 1 000 km de haut (de la surface terrestre à la limite supérieure de l'atmosphère).

La pression de l'air baisse à mesure que l'altitude augmente. Elle est quasiment divisée par deux tous les 5 km d'altitude, d'où le terme « raréfaction de l'air ». Elle s'exprime en mm de mercure (mm Hg) ou en millibar.

La pression atmosphérique normale est par définition 101325Pa, elle est égale à une pression exercée par une colonne de mercure de 0,76m de hauteur à 0°C et sous l'accélération normale de la pesanteur  $9.80669 \text{ m/s}^2$ . [1]

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 1 \text{ bar} = 10 \text{ N/m}^2 = 10 \text{ Pa}$$

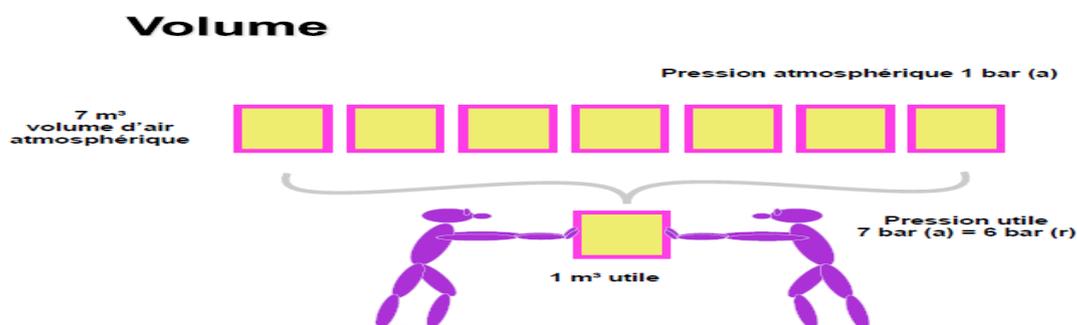
## 2. L'air comprimé :

C'est l'air prélevé dans l'atmosphère, dont on utilise la compressibilité à l'aide d'un système pneumatique. Cet air est maintenu sous une pression supérieure à celle de l'atmosphère. Ou bien, l'air peut être comprimé, c.-à-d. qu'un volume d'air donné peut être réduit, entraînant une augmentation de la pression dans le nouveau volume obtenu. La compression de l'air est effectuée dans une machine dotée d'une source de puissance: le compresseur.

L'air comprimé est considéré comme le quatrième fluide utilisé dans l'industrie, après l'électricité, le gaz naturel et l'eau. En Europe, au début des années 2000, 10 % de toute l'électricité utilisée par l'industrie sert à produire de l'air comprimé, cette consommation s'élevant à 80 TWh / an. [2]

L'air comprimé est une forme d'énergie emmagasinée qui sert à faire fonctionner des machines, des équipements ou des procédés industriels. L'air comprimé est utilisé dans la plupart des industries de fabrication et dans certaines industries de services, notamment dans les cas où l'utilisation directe de l'électricité pour alimenter des outils ou des appareils se révèle peu pratique. [3].

1 bar augmente de 6 à 10 % la consommation énergétique.



*Figure 6: schéma explicatif d'air comprimé*

Dans l'industrie, les circuits d'air comprimé permettent d'alimenter des outils et des automatismes, avec certains avantages :



- ✓ transport facile dans des conduites
- ✓ propreté
- ✓ faible coût des composants
- ✓ grande robustesse, pas de risque de détérioration pour cause de surcharge (moteurs pneumatiques de visseuses).
- ✓ pas de pollution pour les échappements d'air et les fuites.
- ✓ utilisation idéale en milieu explosif.
- ✓ capacité de refroidissement.
- ✓ peu sensible aux vibrations.
- ✓ plus sécurisant que l'emploi de l'électricité.

Malgré de nombreux avantages, l'automatisation par l'air comprimé présente des inconvénients qu'il faut prendre en considération :

- ✚ nécessité de propreté de l'air (filtration). Aucune impureté (poussière etc.) ne doit pénétrer dans le système. L'eau (venant en particulier de la condensation de l'humidité de l'air ambiant) et l'huile (venant du compresseur) doivent être retirées à l'aide de filtres ou de sècheurs ; toutefois il peut être nécessaire de réintroduire de l'huile pour lubrifier certains outils : cette huile se retrouve alors à l'échappement.
- ✚ difficulté d'obtenir des vitesses régulières et des puissances constantes du fait de la compressibilité de l'air et des variations de pression lors de sa détente. [2]

### 3. Généralité sur les compresseurs :

#### ➤ Définition :

Un compresseur est un mécanisme qui permet de transformer de l'énergie mécanique en énergie pneumatique.

#### ➤ Classification des compresseurs :

- Compresseurs d'air volumétriques :

Les compresseurs d'air volumétriques élèvent la pression de l'air par réduction du volume. Cette réduction est obtenue par des moyens mécaniques différents.

- Compresseurs d'air dynamiques :

Les compresseurs d'air dynamiques réalisent la compression de l'air en l'entraînant à grande vitesse sans lui imposé une réduction de volume. [4]

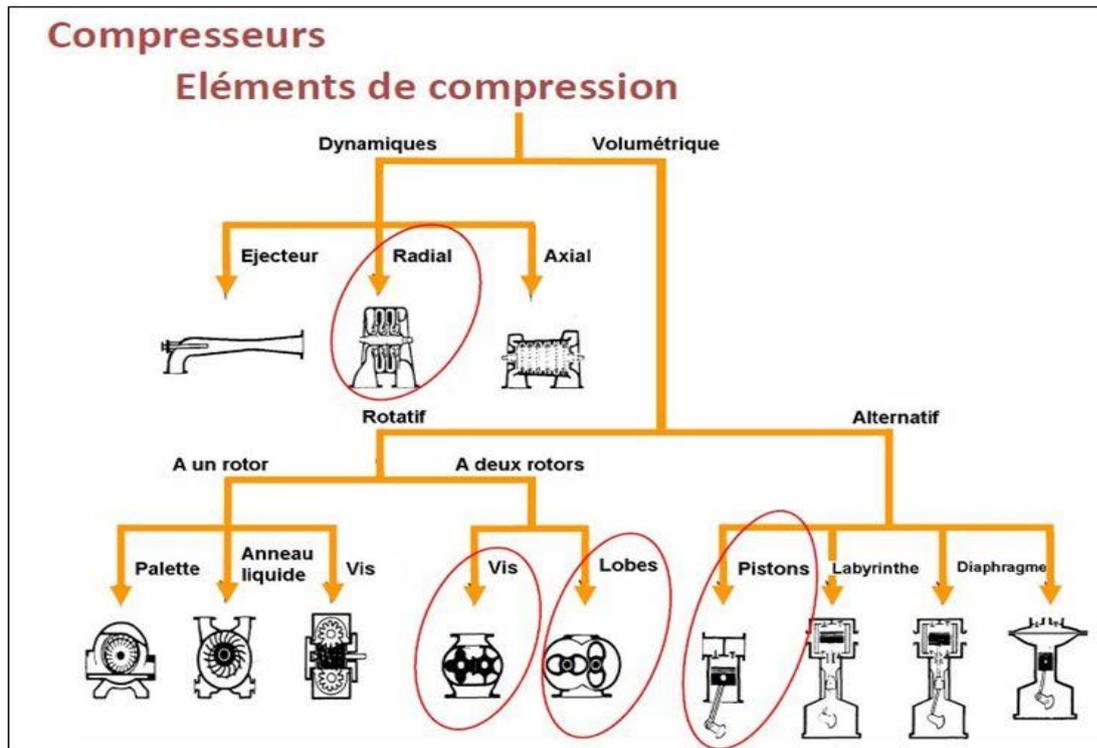


Figure 7 : classification des compresseurs

## II. Les compresseurs à vis d'air comprimé :

### 1. Les composants d'un compresseur à vis d'air comprimé :



- 1 Bloc vis
- 2 Moteur EPACT
- 3 Graissage Moteur
- 4 Soupape d'aspiration
- 5 Soupape pression mini-clapet anti-retour
- 6 Vanne mise à vide/régulation
- 7 Refroidisseur d'huile avec Vanne thermostatique et Micro Filtre à huile
- 8 Refroidisseur final d'air
- 9 Filtre à air d'aspiration bi-étagé
- 10 Réservoir Séparateur d'huile avec Cartouche séparatrice
- 11 Soupape de sûreté
- 12 Plots d'isolation, silent bloc
- 13 SIGMA-Control

Figure 8: schéma des composants d'un compresseur à vis

- On peut ajouter qu'une installation de production contient un sécheur qui va empêcher l'air de condenser et par conséquent protéger l'installation contre l'eau, et un réservoir où l'air comprimé de multiples compresseurs sera stocké pour l'envoyer à un balan qui va le distribuer dans l'installation. [5]

## 2. Fonctionnement :

Les compresseurs à vis KAESER aspirent l'air frais par la soupape d'aspiration située sur le cartère du compresseur puis cet air sera traité via le filtre d'aspiration équipé d'une cartouche micro-filtrante en papier. L'air purifié entre dans le bloc vis après être passé dans le clapet d'aspiration. Le séparateur est évacué du bloc vis et entre dans la cuve mixte sans n'avoir traversé aucuns tuyaux. L'huile et l'air sont séparés selon un procédé mécanique par déviation de courant et diminution de la vitesse d'écoulement. L'air comprimé parvient dans le refroidisseur via le clapet anti-retour à pression minimal. L'huile séparée dans la cuve mixte horizontale est refroidie dans le radiateur d'huile où elle redescend à une température optimale avant d'être injectée dans le bloc vis. Puis l'huile sera filtrée dans un micro-filtre d'une manière à être réutilisée dans le circuit d'huile. Le bulbe thermostatique monté dans le circuit d'huile garantit une température d'huile optimale dans tous les modes de fonctionnement.

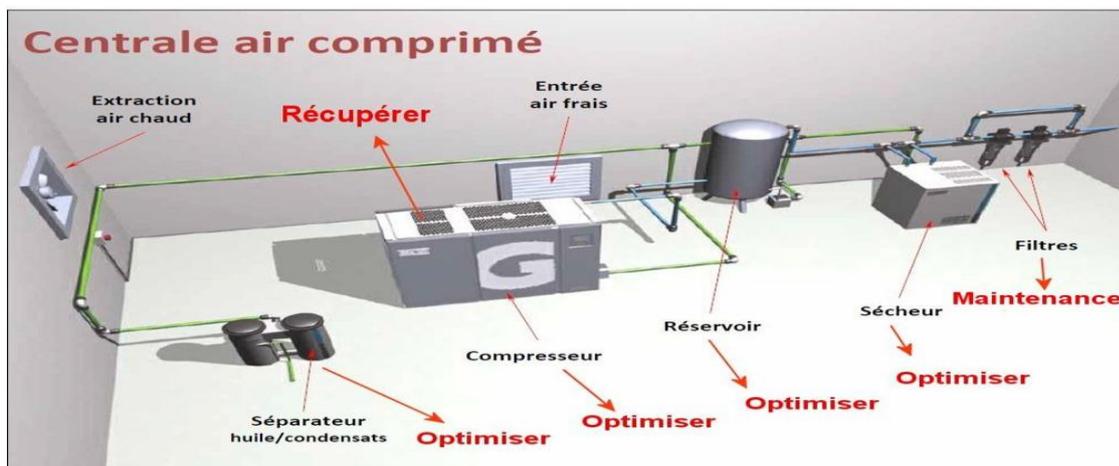


Figure 9: Schéma d'une installation de production d'air comprimé

## 4. Caractéristiques techniques d'un compresseur KAESER DSD 171 :

### a) Le compresseur :

- ✓ Pression de service maximale ..... 8,5 bar
- ✓ Température de service. .... 75 --- 100 °C (varie selon la pression de service et les conditions atmosphériques telles que l'humidité de l'air et la température ambiante)
- ✓ Poids ..... 3150 kg
- ✓ Intensité du courant d'utilisation ..... 179 A



EST FES

- ✓ Fréquence ..... 50 Hz
- ✓ Pression de fonctionnement ..... 11,5 bar

### b) Le moteur :

#### Moteur de compresseur:

- ✓ Puissance nominale ..... 90 kW
- ✓ Vitesse nominale de rotation .....  $1500 \text{ min}^{-1}$

#### Moteur ventilé:

- ✓ Puissance nominale ..... 0,4 kW
- ✓ Vitesse nominale de rotation .....  $1500 \text{ min}^{-1}$

### c) Condition d'utilisation :

- ✓ Altitude maximum d'utilisation ..... 1000 m
- ✓ Température ambiante minimale ..... 3 °C
- ✓ Température ambiante maximale ..... 46 °C
- ✓ Température minimale d'air de refroidissement et d'air d'aspiration ... 3 °C
- ✓ Température maximale d'air de refroidissement et d'air d'aspiration ... 46 °C
- ✓ Orifice d'entrée d'air .....  $0,4 \text{ m}^2$
- ✓ Aération artificielle par ventilateur ..... 4800 m<sup>3</sup>/h pour 100 Pa
- ✓ Air évacué utilisable pour la récupération des calories:  
conduit de chauffage l x h ..... 420 x 420 mm

### d) Volume d'huile :

- ✓ Volume total ..... 72 l
- ✓ **Après une vidange ou après un stockage de longue durée**  
Volume d'huile à rajouter dans le bloc compresseur ..... 4 l
- ✓ **Appoint d'huile du niveau mini au niveau maxi**  
Volume d'huile à rajouter ..... 13 l

### e) lubrification et graissage :

Le refroidissement et la lubrification sont des facteurs décisifs pour un fonctionnement fiable de la centrale.

Les liquides de refroidissement des compresseurs à vis accomplissent des tâches importantes:

- Pendant la compression, ils assurent l'étanchéité dans le bloc compresseur pour un taux de compression maximum.
- Ils dissipent la chaleur générée par la compression, ce qui assure le refroidissement du compresseur et réduit la température de l'air comprimé.
- Le liquide de refroidissement doit résister à la chaleur et à la pression et absorber les impuretés qui se trouvent dans chaque compresseur. [5]

### N.B :

- Les avantages d'un **compresseur à vis** sont :
  - ✓ Rendement élevé et grande flexibilité de débit, grande durée de vie (15 ans à 8h/j).



- ✓ Peu de maintenance.
- ✓ Bruit faible.
- ✓ Grande flexibilité de débit

### III. Problématique :

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

La cimenterie de Fès connu des problèmes au niveau de conditionnement de salle des compresseurs, aussi de la maintenance et surtout les filtres, sans oublier, les fuites au niveau du circuit d'air. Notre intervention se déroulera autour de ces problèmes.

- **Méthode de QQOQCP :**

<b>Quoi ?</b>	<b>Optimiser la consommation des compresseurs DSD 171</b>
<b>Qui ?</b>	service de maintenance
<b>Où ?</b>	LafargeHolcim de Fès
<b>Quand ?</b>	La période du stage du Avril - Mai 2018
<b>Comment ?</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• l'identification du conditionnement de la salle des compresseurs.</li><li>• Faire un plan de maintenance préventive.</li><li>• Faire une campagne de chasse aux fuites.</li></ul>
<b>Pourquoi ?</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• La consommation d'électricité des compresseurs est élevée.</li><li>• Le coût de la maintenance est élevé.</li></ul>

*Tableau 8 : méthode QQOQCP*

## Chapitre IV :

« Optimisation de la consommation des compresseurs d'air comprimé DSD 171 »

## I. Rationalisation de la consommation d'air comprimé :

### 1. Conditionnement de la salle :

Pour assurer un bon conditionnement de la salle, la température doit être inférieure à 25°C, et il faut diminuer les poussières et la rouille.

La salle des compresseur se situe à coté du broyeur et du filtre, ce facteur entraine une augmentation des poussières et aussi de la température.



Figure 10: porte de la salle

- Ventilation et filtration de la salle :

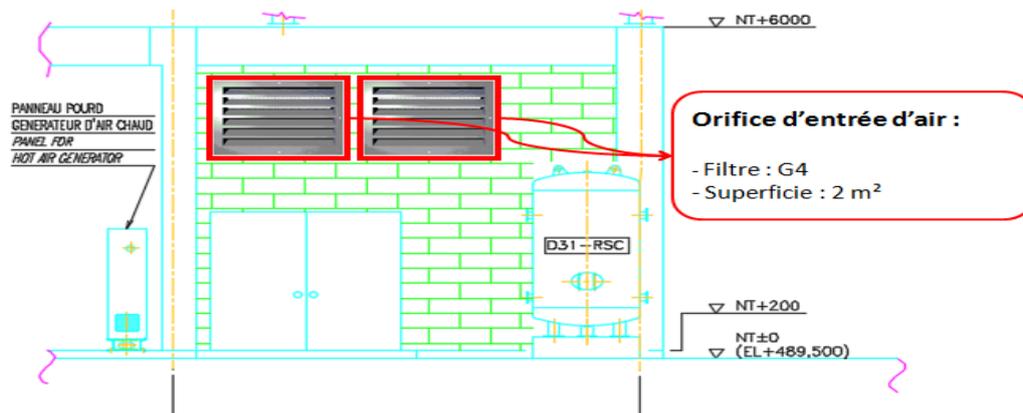


Figure 11: schéma de la salle des compresseurs

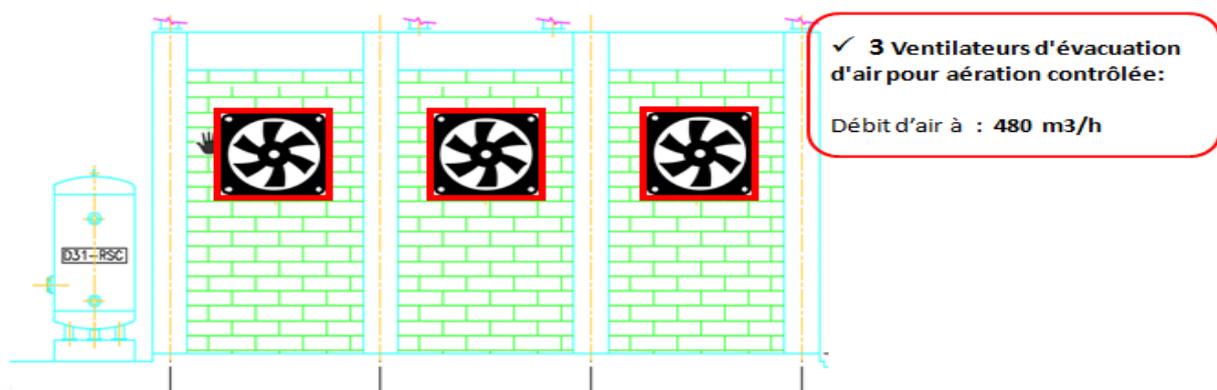


Figure 12: schéma des ventilateurs dans la salle

- Remarque :

-L'absence d'un système de filtration ce qui explique la forte existence des poussières.



*Figure 13 : l'orifice d'air dans la salle des compresseurs*

- Les ventilateurs sont sous dimensionnés, ce qui permet d'augmenter la température de la salle.



*Figure 14 : ventilateurs sous dimensionnés*

- Aménagement de la salle des compresseurs :

Pour améliorer le conditionnement de la salle des compresseurs, nous proposons les solutions suivantes :

- Reconstruire la salle des compresseurs avec une matière d'isolation.
- Ajouter une autre porte, en faisant un filtre entre les deux portes pour diminuer les poussières.
- Construire deux murs : la distance entre eux est 2m, en installant un système de filtration.

## 2. Suivi des consommateurs d'air comprimé :

\* Les consommateurs d'air comprimé dans le secteur ciment sont les petites filtres et le filtre process qui est considéré comme le grand consommateur .

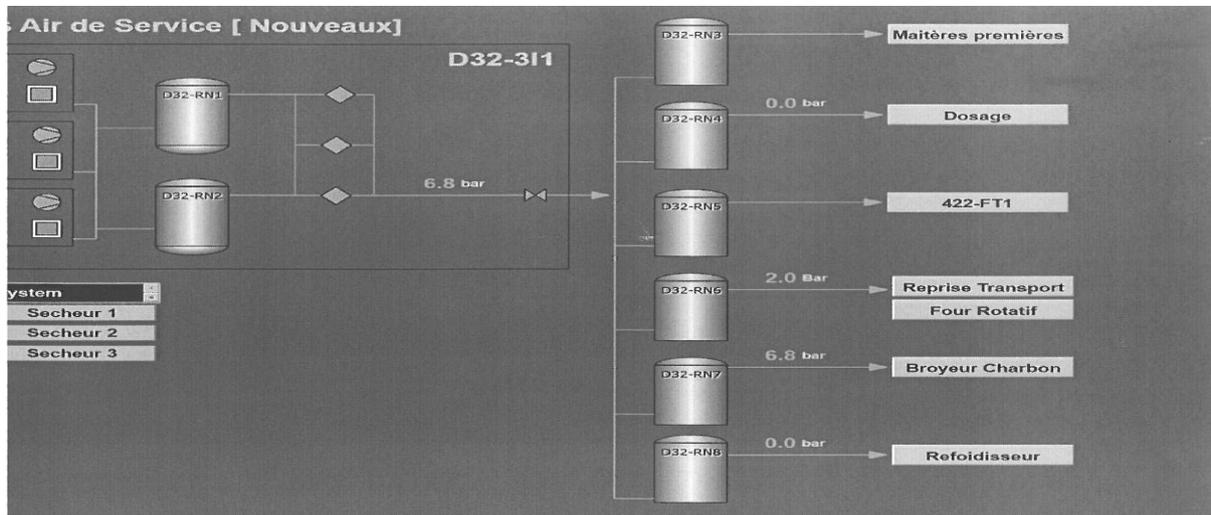


Figure 15 : schéma (1) des consommateurs d'air comprimé

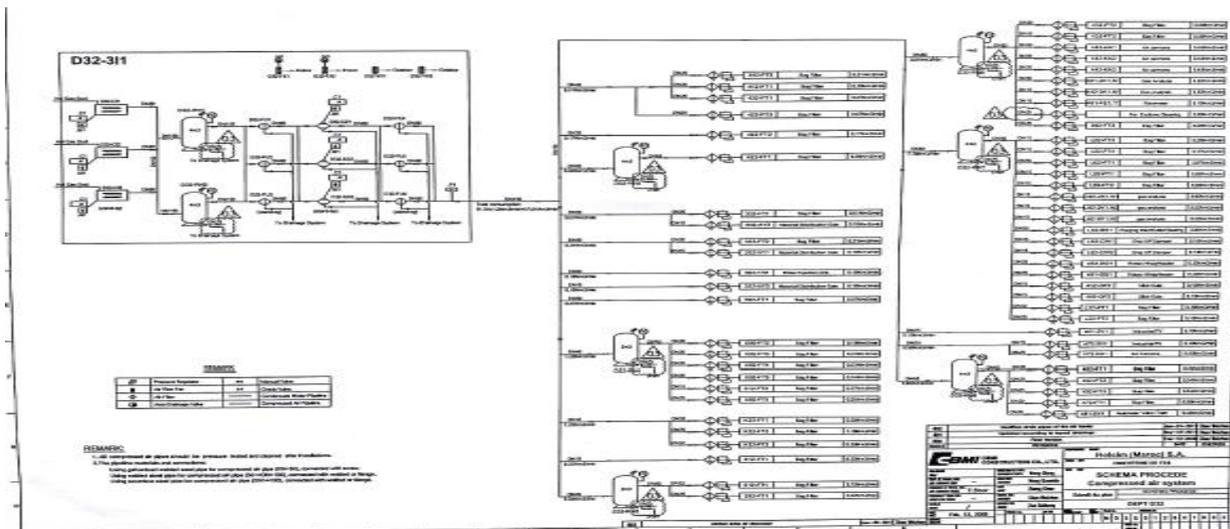


Figure 16: schéma (2) des consommateurs d'air comprimé

D'après ce schéma, on remarque que le débit demandé d'air comprimé est  $20,4m^3/min$ , et on sait que le cycle de battage du filtre process est 1h30min.

## II. Etude des causes de défaillance :

### 1. La méthode de Pareto :

Pour savoir les problèmes les plus critiques durant l'année 2017, on applique la méthode de Pareto :

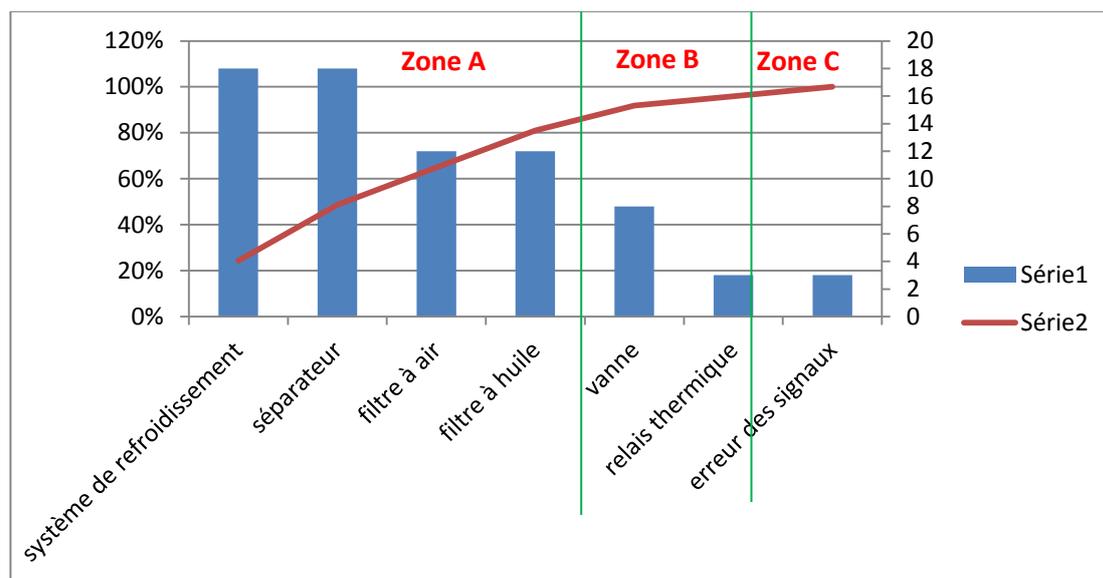
On classe ces incidents dans un ordre décroissant puis on calcule la criticité et le pourcentage cumulé.

➤ Tableau de classement des criticités :

Elément	Criticité	Criticité en %	cumulé en %
système de refroidissement	18	24,32	24%
Séparateur	18	24,32	49%
filtre à air	12	16,21	65%
filtre à huile	12	16,21	81%
Vanne	8	10,81	92%
relais thermique	3	4,05	96%
erreur des signaux	3	4,05	100%
Total	74		

**Tableau 9 : classement des criticités du compresseur DSD 171**

➤ Le diagramme de Pareto :



**Figure17 : diagramme de Pareto**

➤ Analyse du diagramme :

- Zone A : système de refroidissement, séparateur, filtre à air et filtre à huile.
- Zone B : vanne et relais thermique constituent 96% du dysfonctionnement.
- Zone c : erreurs des signaux

Les éléments suivants : système de refroidissement, séparateur, filtre à air et filtre à huile forment la zone A, ils représentent 81% des dysfonctionnements, ce sont donc ces 4 composants qui sont critiques au point de vue maintenabilité. Sur ces 4

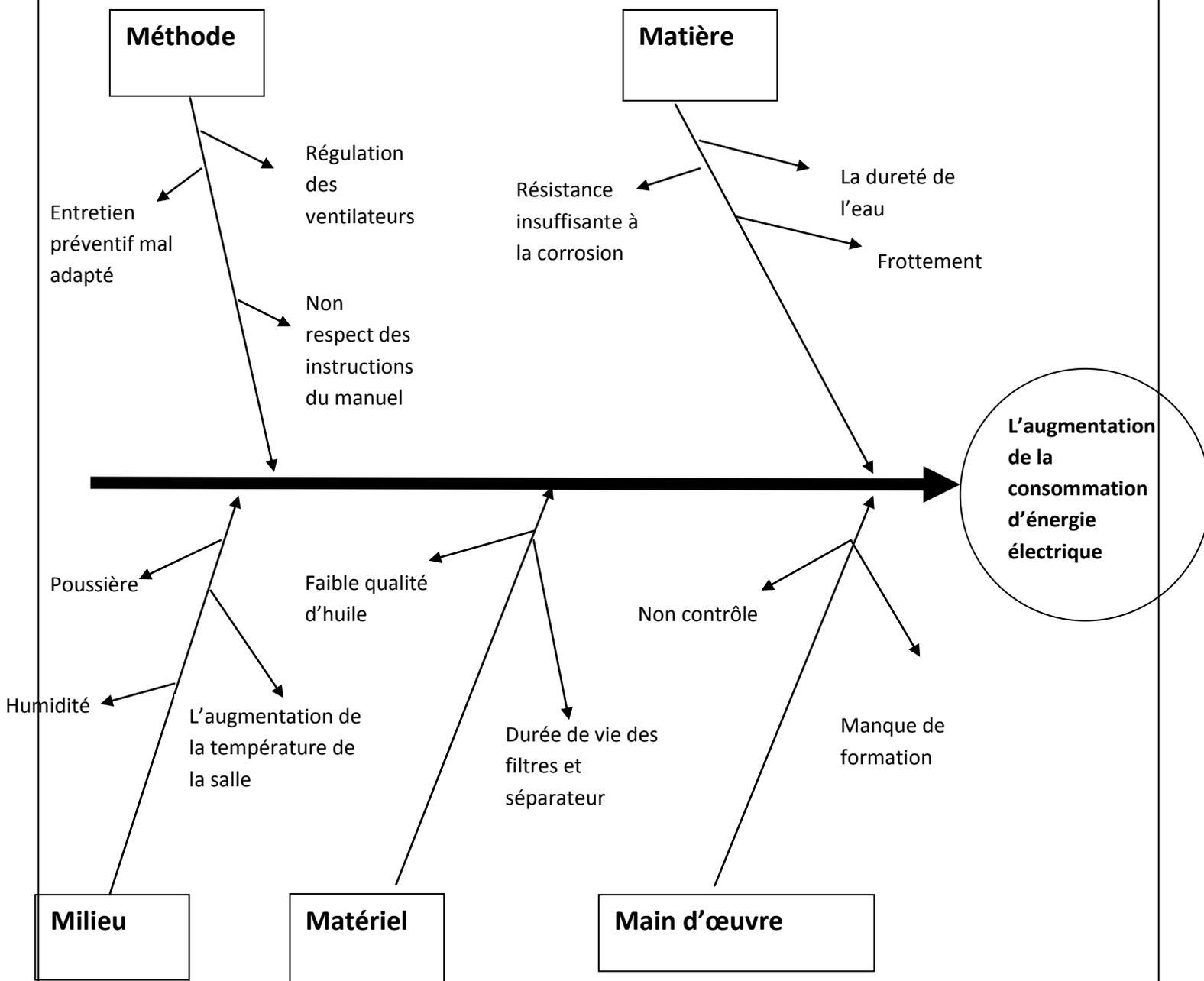
éléments qu'il faut focaliser les efforts émettant en œuvre un plan d'actions prioritaire. Dans ce cas il faut chercher les causes des dysfonctionnements, chercher les solutions appropriées pour éliminer ces causes et enfin engager les actions correctives sur ces 4 éléments, comme le plan d'actions correctives suivants :

Élément de la zone A	Les actions correctives
Système de refroidissement	Détartrage du système de refroidissement en utilisant des oxales contre le calcaire
Séparateur	Contrôle de la pression différentielle de la cartouche séparatrice d'huile.  Changer le tamis du collecteur de poussières.  Vérification de l'étanchéité de la salle des compresseurs.
Filtre à air	Contrôle de la soupape  Vérification de l'étanchéité de la salle des compresseurs
Filtre à huile	Vidange d'huile non appropriée et la remplacer par une huile préconisée

*Tableau 10 : actions correctives des défaillances*

## 2. Le diagramme d'ISHIKAWA :

Le Diagramme de causes et effets ou diagramme d'Ishikawa Kaoru Ishikawa (synonyme : diagramme en arêtes de poisson). Diagramme permettant d'examiner les causes profondes des problèmes. En posant continuellement la question « Pourquoi? », on finit par découvrir la véritable cause du problème. Généralement utilisé pour mettre en évidence les causes d'un problème et les regrouper dans des familles qui sont les 5 M suivants: - Main-d'œuvre : tout le personnel de toute activité. - Matière : matière de production, rechanges... - Méthodes : procédures, documents, décisions, organisation... - Moyens : machine, outillages... - Milieu : locaux, environnement... Nous avons appliqué la méthode des 5M afin de trouver les causes de ces imperfections. Le résultat est dans le diagramme ci-dessous :



### 3. L'étude AMDEC

- **Définition :**

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) est une méthode d'analyse prévisionnelle de la fiabilité qui permet de recenser les modes de défaillances potentielles dont les conséquences affectent le bon fonctionnement du moyen de production, de l'équipement ou du processus étudié, puis d'estimer les risques liés à l'apparition de ces défaillances, afin d'engager les actions correctives ou préventives. Cette méthodologie n'est réellement efficace qu'avec l'expérience, donc il faut se renseigner en profondeur auprès des personnes compétentes.

- **Types d'AMDEC :**

Il existe plusieurs types d'AMDEC, parmi ces types on cite :

- AMDEC Procédé : on identifie les défaillances du procédé de fabrication dont les effets agissent directement sur la qualité du produit fabriqué (les pannes ne sont pas prises en compte).
- AMDEC Machine (ou moyen) : on identifie les défaillances du moyen de production dont les effets agissent directement sur la productivité de l'entreprise. Il s'agit donc de l'analyse des pannes et de l'optimisation de la maintenance.
- AMDEC Produit : elle est utilisée pour évaluer les défauts potentiels d'un nouveau produit et leurs causes.

- **Analyse de défaillance :**



- ✚ La cause : c'est l'anomalie qui conduit au mode de défaillance. La défaillance est un écart par rapport à la norme de fonctionnement.

Les causes trouvent leurs sources dans cinq grandes familles, on en fait l'inventaire dans des diagrammes dits « diagrammes de causes à effets ». Chaque famille peut à son tour être décomposée en sous-famille. Un mode de défaillance peut résulter de la combinaison de plusieurs causes. Une cause peut être à l'origine de plusieurs modes de défaillance.

- ✚ Mode de défaillance : il concerne la fonction et exprime de quelle manière cette fonction ne fait plus ce qu'elle est sensée faire. L'analyse fonctionnelle recense les fonctions, l'AMDEC envisage pour chacune d'entre elles sa façon (ou ses façons car il peut y en avoir plusieurs) de ne plus se comporter correctement.
- ✚ L'effet : concrétise la conséquence du mode de défaillance, il dépend du point de vue AMDEC que l'on adopte :
  - ✓ Effets sur la qualité du produit (AMDEC procédé).

- ✓ Effets sur la productivité (AMDEC machine).
- ✓ Effets sur la sécurité (AMDEC sécurité).

- **Evaluation :**

L'évaluation se fait selon trois critères principaux :

- La gravité
- La fréquence
- La détection.

Gravité	Valeur	Définition
Mineure	1	-Arrêt de production : moins de 15 minutes -aucune ou peu pièce de rechange nécessaire
Moyenne	2	- Arrêt de production : de 15 minutes à une heure -Pièce en stock
Majeure	3	- Arrêt de production : une heure à deux heures -Pièces en stock ou livraison ultra-rapide
Grave	4	- Arrêt de production : 2 heures et plus -Long délai de livraison

*Tableau 11 : grille de l'échelle de gravité*

Fréquence	Valeur	Définition
Très faible	1	Défaillance rare : moins d'une défaillance par année.
Faible	2	Défaillance possible : moins d'une défaillance par trimestre.
Moyen	3	Défaillance occasionnelle : moins d'une défaillance par semaine.
élevé	4	Défaillance fréquente : plus d'une défaillance par semaine.

*Tableau 12 : grille de l'échelle de fréquence*

Détection	Valeur	Définition
Evident	1	Détection certain, sirène, moyens automatiques, signes évident.
Possible	2	DéTECTABLE par l'opérateur, par des routes d'inspections, vibrations.
Improbable	3	Difficilement détectable, moyens complexes (démontages, appareils).
Impossible	4	Indétectable, aucune signes .

*Tableau 13 : Grille de l'échelle de détection*

$$C = G \times F \times D$$

C : Criticité ; G : Gravité ; F : Fréquence ; D: détection.

Valeurs	Définition
1-6	Négligeable
8-18	Moyenne
24-36	Elevée
48-64	Interdit

Tableau 14 : grille de l'échelle de la criticité

Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité										
système compresseur DSD 171										
Composant	Fonction	mode de défaillance	causes	effet	mode de détection	F	G	D	C	
système de refroidissement	refroidit l'huile	surchauffement huile	durée d'eau élevée	bouillonnement	Alarme au niveau de la salle de contrôle	3	4	1	12	Décharge du système de refroidissement en utilisant des valves contre le caballe
		Manque d'huile	défaut après démarrage	fuite d'huile	visuel	4	4	1	16	Utiliser un ventilation plastique qui réagit à la température et au pression
		Chute du débit d'eau	étanchéité des flexques ou flexques	fuite d'eau	visuel	2	4	1	8	Effectuer une visite chaque 3 jours
		Usure de lavanne à membrane	Présence de l'eau dans la membrane	préage		2	4	3	24	Changement des vannes
Filtre à air	Filtre l'air contre les poussières		*Niveau d'huile du réservoir séparateur d'huile trop élevé.	fuite d'huile sur le filtre à air	visuel	3	2	2	12	Contrôle de la soupape
			*Filtre à huile colmaté	la température de sortie trop élevée.		3	2	1	12	Vidange d'huile non appropriée et la remplacer par une huile préconisée
séparateur	sépare l'huile et l'air		cartouche séparatrice d'huile colmatée	niveau d'huile diminué	visuel	3	3	2	18	Contrôle de la pression différentielle de la cartouche séparatrice d'huile
			cartouche séparatrice cassée							Changer le tamis du collecteur de poussières
roulement	facilite la rotation	Chopage	Manque de graisse			4	1	2	8	Respect de la fréquence et de la quantité de graisse
		Usure	Étanchéité flexque	Nettoyé grillé	visuotip	4	1	2	8	
		Boilage	Durée de vie			4	1	3	12	Ajout dans le bac de contrôle état de roulement du moteur
		Casse	Corps étranger			4	2	2	16	
		Usure	Usure bagage			4	2	2	16	Acheter flexible résistant
Vanne thermostatique	optimisation du refroidissement d'huile	surchauffement	lubrification insuffisante	compresseur inefficace	Niveau d'huile	3	2	2	12	Remettre à jour le liste de quantité et de qualité de graisse
			formation de tartre sur le diamètre interne de la conduite	débit d'eau faible	visuel après démarrage	3	3	3	27	Pré montage et démarrage systématique
			Durée de vie	Qualité d'huile	Qualité d'huile	visuel	3	2	1	12
Vanne pneumatique	Maintenir une pression minimum de 2 bars dans le réservoir	détérioration du ressort	Chaleur excessive	Vanille en charge continue	Salle de contrôle	2	2	3	12	Maintenir en stock au moins une vanne

#### 4. Plan de maintenance préventive :

Après l'identification des causes de défaillances par les trois méthodes précédentes, on propose le plan de maintenance préventive suivant :

Plan de maintenance préventive		Machine : compresseur d'air KAESER DSD171					Observation
Exécutant : technicien de formation mécanique		Fréquence					
Opérations		J	M	T	S	A	
Vérifier le niveau d'huile du compresseur		X					Contrôle



Contrôler la cartouche du filtre d'air		X				à l'arrêt
Nettoyer la cartouche du filtre d'air				X		à l'arrêt
Remplacer la cartouche du filtre d'air					X	à l'arrêt
Changer la cartouche du filtre d'huile			X			à l'arrêt
Vérifier le clapet de retour d'huile					X	à l'arrêt
Contrôler l'étanchéité des raccords				X		à l'arrêt
Vérifier l'état des canalisations					X	à l'arrêt
Contrôler le système de refroidissement		X				à l'arrêt
Contrôler la soupape de sécurité				X		à l'arrêt
Graisser le palier du moteur				X		à l'arrêt
Vérifier le clapet d'aspiration					X	à l'arrêt
Vérifier l'état d'accouplement					X	à l'arrêt
Nettoyer le dispositif de commande			X			à l'arrêt
Vérifier le robinet de vidange	X					En marche

J: jour / M:mensuel/ T:trimestrielle/ S:semestrielle/ A : annuelle

Tableau 15: plan de maintenance préventive

N.B : la plupart des pièces de rechanges des compresseurs se trouvent dans le magasin, pour diminuer le temps d'arrêt, et si une pièce n'existe pas dans le magasin, le temps de la demande est presque un jour. Cependant, il y a deux compresseurs fonctionnent et un autre reste en réserve au cas où un compresseur tombe en panne, il va fonctionner.

### III. Résultats et interprétations :

#### 1. Calcul du débit d'air et débit des fuites :

Pour savoir le débit

a) Calcul du débit d'air :

Soit  $Q_r$  le débit réel.

On a l'équation du gaz parfait :  $P.V=n. R.T = \frac{m}{M}.R.T$

En remplaçant les relations suivantes :  $n = \frac{m}{M}$  et  $Q_m = \frac{dm}{dt} = Q_r \cdot \rho$ . Avec  $\rho = \frac{m}{V}$

Tel que :  $n$  = la quantité de matière,  $Q_m$  : le débit massique,  $\rho$  : la masse volumique

$$\text{Donc } Q_r = \frac{Q_m}{\rho} = \frac{dm}{\rho \cdot dt} \text{ or } m = \frac{V.M.P}{R.T} \text{ et } dm = \frac{V.M}{R.T} \frac{dP}{dt}$$

Ce qui implique l'expression de débit réel suivante :

$$Q_r = \frac{V.M}{R.T.\rho} \frac{dP}{dt}$$

Avec  $V=4m^3$ ,  $\rho = 1225 \text{ Kg}/m^3$ ,  $T=298.5 \text{ K}$ ,  $R=8.314 \text{ (SI)}$ ,  $M=28,96g/mol$ .

D'où :

$$Q_r = K * \frac{dP}{dt}$$

A.N :  $K=cte = 3,81.10^{-5}$

- Remarque :

Avant de calculer le débit réel du compresseur, on a fermé la vanne d'alimentation pour pouvoir purger le ballon d'air afin de calculer le rapport entre la différence de pression et la différence de temps correspondante.

On a relevé pratiquement  $\frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{(6.03 - 0,5).10^5}{1,61} = 3,438 \cdot 10^5 \text{ Pa}/\text{min}$

D'où :

$$Q_r = 13,1 \text{ m}^3/\text{min}$$

b) Calcul du débit des fuites :

Soit  $Q_f$  le débit des fuites, avec  $T_f = \frac{t}{T}$  est le taux des fuites

Tel que  $t = \sum t_i$  : la durée pour laquelle le compresseur fonctionne en charge de 7,2 bar à 8 bar. Et On a :

$T = t_f - t_i$  avec  $t_i$  est l'instant qui représente le premier fonctionnement à vide.  
 $t_f$  est l'instant qui représente le dernier fonctionnement en charge.

- En utilisant le chronomètre, on a relevé les valeurs suivantes :

$T = 36,7$  min

$t_i$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$	$t_6$	$t_7$
Valeur (min)	1,55	1,55	1,63	1,67	1,58	1,76	1,53

**Tableau 16 : instants de fonctionnement à vide**

Donc  $t = \sum t_i = 11,27$  min

Alors :

$$T_f = 30,708\%$$

Sachant que  $Q_f = T_f \cdot Q_r$  [5] alors :

$$Q_f = 4,02 \text{ m}^3 / \text{min}$$

D'après les résultats précédents, on remarque que le taux et le débit des fuites sont très élevés ce qui nous oblige de détecter les fuites pour les éliminer.

On aura que 69,29% de la consommation énergétique utilisée, ainsi 30,7% de la consommation énergétique sous forme de pertes.

Pour comprendre le réglage des compresseurs effectué, on a mesuré le temps de marche et le temps de fonctionnement à vide.

## 2. Suivi de la consommation électrique :

- Calcul des puissances et l'énergie :

On a  $P1 = \sqrt{3} \times I_{max} \times U \times \cos \varphi$

A.N  $= 160,49 \times 400 \times 0,8$

$= 88952,58 \text{ W} = 88,95258 \text{ KW}$

$P2 = \sqrt{3} \times I_{min} \times U \times \cos \varphi$

A.N  $= 101,64 \times 400 \times 0,8$

$$=56334,6 \text{ W} =56,3346 \text{ KW}$$

- L'énergie consommée par jour :

$$\text{On a } E=t_1 \times P1 + t_2 \times P2=0,875 \times 88,95258 + 0,125 \times 56,3346$$

$$\text{D'où } E =84,87534 \text{ KWh}$$

- Calcul des coûts :

- $C_{total} = a \times E$

$$=0,7 \times 84,87534 = 59,41 \text{ DH/h}$$

$$=59,41 \times 24 = 1\,425,84 \text{ DH/j} = 1425,84 \times 26 = 37\,071,84 \text{ DH/mois}$$

$$=37\,071,84 \times 12 = 444\,862,08 \text{ DH/an}$$

- $C_1 = 444\,682,08 \times 0,639 = 308\,289,42 \text{ DH/an}$
- $C_2 = 444\,682,08 \times 0,307 = 136\,517,38 \text{ DH/an}$

Avec:  $t_1$ : taux du temps de fonctionnement en charge ( $t_1 = \frac{21}{24} = 0,875$ ).

$t_2$ : taux du temps de fonctionnement à vide ( $t_2 = \frac{3}{24} = 0,125$ ).

a : prix moyen d'un KWh ;  $C_1$  : coût d'énergie utilisée ;  $C_2$  : coût des pertes

➤ **Résumé :**

	Heures de fonctionnement	
	Cas réel	Cas théorique
Compresseur DSD 171	21	18
Ecart /jour	3	
Energie consommée /jour	84,87534 KWh	
Prix moyen en KWh	0,7 DH	
Prix d'énergie consommé/an	444 862,08 DH	
Prix d'énergie de pertes/an	136 517,38 DH	

### Tableau 17 : bilan électrique

#### 3. Interprétation :

À cause de la grande surface de l'industrie, et la globalité des équipements qui travaille avec l'air comprimé, on ne peut jamais détecter toutes les fuites et les résoudre, pour cela on doit proposer des solutions pour diminuer la consommation en conservant la qualité et la quantité du produit.

Normalement un compresseur DSD 171 doit fonctionner 18h en maximum, mais d'après les résultats précédents, on remarque que ces compresseurs fonctionnent 24h, donc ils dépassent la valeur limite, ce qui justifie la grande consommation de l'électricité. On peut expliquer ce mauvais fonctionnement par la croissance de la demande d'air comprimé puisque ces compresseurs travaillent en fonction de la demande.

D'après cette interprétation et d'après la quantité d'air utilisée pour alimenter l'industrie, on déduit qu'on ne peut jamais faire un réglage moyenne pour les compresseurs, les deux solutions sont : la détection des fuites pour les éliminer et aussi respecter le plan de maintenance préventive.

En ce qui concerne la première solution « la détection des fuites », on peut dire qu'elle est difficile car presque chaque semaine LAFARGEHOLCIM installent des nouveaux équipements et nouveaux ventilateurs, donc l'étude ne peut pas être fixe.

Finalement, on déduit qu'on ne peut jamais détecter toutes les fuites, mais on peut détecter les 25% à 35 % des fuites dans l'industrie.

On a trouvé que le filtre process est réglé pour fournir une pression égal à 7 bars afin de faire le battage, alors il dépasse la valeur conseillé par le fournisseur qui est 4,5 bars. Cependant, on a trouvé que la pression minimale expérimentale doit être égale à 5 bars.

#### 4. Chasse aux fuites :

Pour diminuer le taux de fuite, on a fait une campagne de chasse aux fuites. Les fuites qu'on a détectées sont :

- Les manches filtrantes :

La détérioration des manches filtrantes constitue un problème financier du fait du coût de fonctionnement lors de travail du filtre à manche, elle peut conduire à des baisses d'efficacité de filtration.



*Figure 18 : manches avant l'usage*



*Figure 19 : manches détériorées*

- Le réseau d'air comprimé :



*Figure 20 : refroidisseur colmaté*



*Figure 21 : soufflage avec l'air comprimé*

#### **IV. Autres solutions :**

On peut proposer la solution d'utiliser un variateur de vitesse lié au moteur du compresseur avec la vitesse de rotation du moteur est proportionnelle à la pression en aval du compresseur car le dimanche, l'expédition ne travaille pas, alors les filtres qui consomment l'air comprimé surtout le filtre process n'ont pas besoin des pressions très élevée, donc le rôle de ce variateur est diminuer la consommation énergétique.

Puisque l'énergie récupérée du compresseur présente 90% de la chaleur donc, l'utilisation de cette dernière pour le chauffage de l'eau de la douche des employés de l'usine.

Sachant que le cycle de battage du filtre process est égal 1h 30min avec une pression fournie égale 7 bars, on propose augmenter le cycle de battage par 15 min pour diminuer la demande d'air comprimé dans l'expédition.

**Enfin**, chaque purge évacue une quantité non négligeable d'air comprimé, et pour **optimiser les purgeurs de condensats, il faut :**

- Éviter les purgeurs manuels au profit des purgeurs automatiques qui ne laisseront échapper que les condensats et non l'air comprimé.
- Vérifier périodiquement le bon fonctionnement des purgeurs.

## Conclusion générale

Au terme de cette période passé au sein du service maintenance mécanique dans l'entreprise LafargeHolcim, nous avons eu l'opportunité de travailler sur **l'Optimisation de la consommation des compresseurs d'air comprimé DSD 171** .

Nous présentons le bilan du travail effectué :

D'abord, on a commencé par l'identification du conditionnement de la salle des compresseurs, en proposant des solutions concernant l'isolation thermique et la filtration d'air, ainsi que la représentation des consommateurs d'air comprimé.

Puis, on a analysé la situation actuelle et les problèmes qui génèrent le mal fonctionnement des compresseurs, ainsi que le gaspillage de l'énergie, et afin de déterminer les causes racines des problèmes identifiés précédemment, on a appliqué les méthodes PARETO, ISHIKAWA et AMDEC.

Ensuite, nous avons proposé des actions de maintenance pour résoudre les défaillances en proposant un plan de maintenance préventive.

Enfin, on a réalisé un suivi de consommation électrique pour savoir le prix de l'énergie gaspillée sous forme de fuite, puis on a fait une campagne de chasse aux fuites.

Ce stage a été très enrichissant sur les plans personnel et professionnel, car il nous a permis de découvrir dans le détail le domaine de la cimenterie : ses acteurs, ses contraintes et ses applications. Nous avons eu aussi l'opportunité de participer concrètement à ses enjeux à travers notre mission. Nous avons pu développer nos compétences en termes de pilotage de projet, de travail d'équipe, et de calculs mécaniques. Cette période nous a permis aussi de développer des relations humaines avec les collaborateurs en entreprise qui est un facteur très important dans le cadre professionnel. De plus nous avons eu l'occasion de nous familiariser à l'entourage industriel, de faire preuve d'autonomie et de se confronter aux enjeux du domaine professionnel auxquels nous allons devoir faire face dans l'avenir.

## Bibliographie

- [1] : Le guide de l'air comprimé : les principes de l'air comprimé (documentation de la société Worthington Creyssenac : fabricant international de solution d'air comprimé).
- [2] : [www.wikipedia.org/wiki/air\\_comprimé](http://www.wikipedia.org/wiki/air_comprimé)
- [3] : [www.rnc.gc.ca/energie/produits/reference/](http://www.rnc.gc.ca/energie/produits/reference/)
- [4] : [www.energie.wallonie.be/fr/production de l'air comprimé en industrie.](http://www.energie.wallonie.be/fr/production_de_l'air_comprimé_en_industrie)
- [5] : documentation LafargeHolcim