



Mémoire de projet de fin d'étude pour l'obtention de la
Licence Sciences et Techniques
Spécialité : Conception et Analyse Mécanique

Thème :

**Etude et amélioration du filtre de dépoussiérage de
la salle de compression BK5**

Lieu :

LafargeHolcim

Méknés

Présenté par :

- Hatim El Hamzi
- Abderrahim Laaraj

Encadré par :

- Mr.Khalid Aqraou
- Mr.Jabri Abdelouhhab

Soutenu le 08/06/2017 devant le jury :

- Pr. Jabri Abdelouhhab
- Pr. Imane MOUTAOUAKKIL



Dédicaces

Je dédie ce travail :

A MA TRÈS CHÈRE MÈRE

Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. Puisse le tout puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour.

A MON TRÈS CHÈR PÈRE

Tes conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Ton aide et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter. Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain. Que Dieu le tout puissant te préserve, t'accorde santé, bonheur, et te protège de tout mal.

A MES CHÈRES GRAND

Vous, pour les encouragements et les prières qui m'ont soutenue tout au long de mes études, puissés Dieu vous garder et vous donner santé et longue vie.

A MES CHÈRES Frères

Pour leurs aides, leurs affections et leurs amours. Puisse Dieu vous donner une vie pleine de succès, de joie et de bonheur.

A TOUS MES AMIS (ES)

Pour leur loyauté, soutien et encouragement...



Remerciement

*« Il n'y a guère au monde un plus bel excès que celui de la
Reconnaissance. »*

C'est avec beaucoup d'estime et une sincère reconnaissance que j'accorde à remercier toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de mon projet. L'expression de ma profonde gratitude ne saurait égaler l'aide et le soutien tant sur le plan professionnel que moral qu'elles m'ont apporté tout au long de la période de ce stage. Je tiens tout particulièrement à remercier mon encadrement de stage, M. KHALID AQRAOU, pour son encadrement et pour son accueil, sa compréhension, et sa disponibilité et son aide précieuse m'ayant été d'une grande utilité, ainsi que M. le directeur Général de LAFARGE Ciments MAROC, de m'avoir accepté en tant que stagiaire au sein de LAFARGE Ciments MAROC. Mes remerciements vont également à M. KHALIFA AZZIOUI pour leur soutien technique leur patience et l'intérêt qu'ils ont porté à expliquer et clarifier les choses. D'une façon plus générale, je remercie l'ensemble du personnel de LAFARGE Ciments Maroc, pour l'intérêt qu'ils m'ont porté tout au long de mon stage. Enfin, que toutes personnes que je n'ai pas pu citer, ayant contribué de près ou de loin à l'accomplissement de ce travail, puissent trouver ici l'assurance de ma gratitude.

A toutes ces personnes...

Merci



Sommaire

Dédicaces.....	0
<i>Remerciement</i>	2
<i>Introduction</i>	5
Partie I :	6
LA PRÉSENTATION DE LAFARGEHOLCIM , ET LE PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT	6
I) Présentation générale :	7
1) Le secteur cimentier au Maroc :	7
2) Présentation du groupe Lafarge :	7
3) Lafarge-Maroc :	8
3.1) Historique :	8
3.2) Implantation :	9
4) Holcim :	10
5) Fusion entre groupe Lafarge et Holcim :	11
6) Les activités de LafargeHolcim :	11
II) L'usine de Meknès :	12
1) Présentation LafargeHolcim-Meknès :	12
1.1) Site de LafargeHolcim de Meknès:	12
2) Dates et chiffres clés de l'usine:	13
3) Caractéristique de l'usine:	14
3.1) Equipements:	14
3.2) situation juridique:	15
3.3) Organigramme de LafargeHolcim Meknès :	16
I) Description de la chaine de la production	17
1) Définition de ciment:	17
2) Diffèrent type de ciment :	19
II) Les étapes de fabrication de ciment :	20
1) Abattage et concassage :	21
2) Préparation de cru :	21
3) Cuisson de la farine :	22
4) Broyage de clinker :	22
Partie II :	24
THÉORIE DE FILTRATION	24
I) Introduction :	25
II) Présentation des éléments de dépoussiérage :	25



1) Filtre à manche :	25
1.1) Technologie :	26
1.2) Perte de charge:	27
1.3) vitesse de filtration:	28
1.4) Nature du media:	28
1.5) Avantages et inconvénients:.....	30
1.6) Nettoyage:	31
2) Le ventilateur :	33
3) Transporteur à bande :	34
3.1) Principe:	34
3.2) Principaux composants du Transporteur de matière:	35
3.3) Elévateur a godets :	39
Partie III:	42
ETUDE DE SUJET	42
I) Présentation du sujet :	43
1) Introduction :	43
2) Problématique :.....	43
II) Détection de l'origine des défaillances :	43
1. Etude du filtre :.....	44
Calcul de vitesse de filtration :	45
Conclusion :.....	47
2. Etude du ventilateur :	47
Calcul du débit de refoulement du ventilateur :	48
Tube de Pitot	48
Mesures effectuées :	50
Conclusion :.....	51
3. Etude de la gaine :	51
Positionnement en tête élévateur :.....	51
III) Résolution du problème.....	52
Action proposé de la gaine :	53
CONCLUSION GÉNÉRALE	55
BIBLIOGRAPHIE	56
Annexes	57



Introduction

L'industrie du ciment est ce qu'on appelle une industrie de base parce qu'elle se situe à la source du développement économique. De son principal dérivé, le béton, dépend tout l'équipement d'un pays : logement, écoles, ponts, barrages, routes, etc.

C'est aussi une industrie lourde du fait qu'elle traite une grande masse des matières premières de faible valeur initiale pour aboutir à un produit également d'un faible prix mais dans des installations d'un coût extrêmement élevé.

Dans ce genre d'activités industrielles, il existe des opérations qui dégagent de la poussière. Ces émissions doivent impérativement être contrôlées afin de protéger les personnes, les machines ainsi que l'environnement. Le traitement de la poussière peut s'avérer aussi très rentable de point de vue récupération de produit ayant une valeur marchande.

Etant consciente de ces effets, Lafarge-ciments a entrepris depuis 1998 une politique environnementale appuyé sur les standards de la ISO 14001, et c'est en installant des équipements de dépoussiérage afin de limiter autant que faire se peut les poussières émises des différentes installations de l'usine, et comme le fonctionnement de ces installations étant très affectées par les pannes et défaillances, Lafarge doit assurer leur bon fonctionnement tel est l'objectif de mon sujet de stage.

Ce rapport de stage contient trois grandes parties. La première partie est consacrée à la présentation de LafargeHolcim , et le processus de fabrication du ciment. La deuxième partie parcourra le développement de notre sujet qui est «Etude et Amélioration du filtre de dépoussiérage de la salle de compression BK5 ». Il présentera en premier lieu quelques éléments de l'usine. Enfin la troisième partie accédera au diagnostic des défaillances au niveau du filtre, et finira par l'exposition des solutions du problème.



Partie I :

LA PRÉSENTATION DE LAFARGEHOLCIM , ET LE PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT



I) Présentation générale :

1) Le secteur cimentier au Maroc :

Les cimenteries marocaines génèrent un chiffre d'affaire annuel de 15 milliards Dhs, elles constituent un acteur majeur dans l'économie du Royaume, La moitié du ciment marocain est consommé par 16% du territoire.

Les deux premières régions consommatrices sont le Grand-Casablanca et Tanger- Tétouan, où se trouvent aussi deux des trois usines marocaines de Lafarge, le leader du marché.

L'industrie marocaine du ciment représente une part énorme dans l'économie marocaine, à la fois du fait des énormes quantités produites et du chiffre d'affaire généré, mais aussi par l'ampleur des investissements que cette industrie nécessite.

Les principaux acteurs du ciment marocain sont au nombre de quatre :

	Usine	Capacité usine (t/an)	Capacité Société	Part du marché (%)
LAFARGE CEMENTS	Bouskoura	200000	3760000	41
	Meknès	140000		
	Tétouan	35000		
	Tanger	100000		
CIMAR	Marrakech	120000	2300000	31
	Agadir	110000		
	Safi	60000		
HOLCIM	Oujda	140000	2000000	21
	Fès	60000		
ASMENT	Temara	63000	930000	7

Tableau 1 : Les principaux acteurs du ciment au Maroc

2) Présentation du groupe Lafarge :

Créée en 1833, le groupe rassemble plus de 78000 collaborateurs dans 75 pays et réalise un chiffre d'affaires de 9.8 milliards d'Euros. Le groupe a développé et mis en œuvre à travers le monde un savoir-faire d'efficacité industrielle, d'économie de ressources et de respect des hommes et de l'environnement.



LAFARGE fait évoluer et progresser les matériaux de construction et permis ainsi d'apporter toujours plus de sécurité, de confort et de beauté au cadre de vie quotidienne. LAFARGE regroupe plus de 160000 actionnaires dans le monde entier, aucun d'eux ne pourra dépasser 5% d'eux capital social du groupe. Les actionnaires ont le droit d'être informé sur l'activité du groupe, des rapports annuels, des lettres adressées aux actionnaires et un accès au site de LAFARGE sur Internet. Être actionnaire, c'est avoir le droit de voter aux assemblées générales soit par présence physique, soit par correspondance ou procuration. Être actionnaire, c'est aussi avoir le droit de voter aux dividendes en fonction du nombre d'actions détenues.

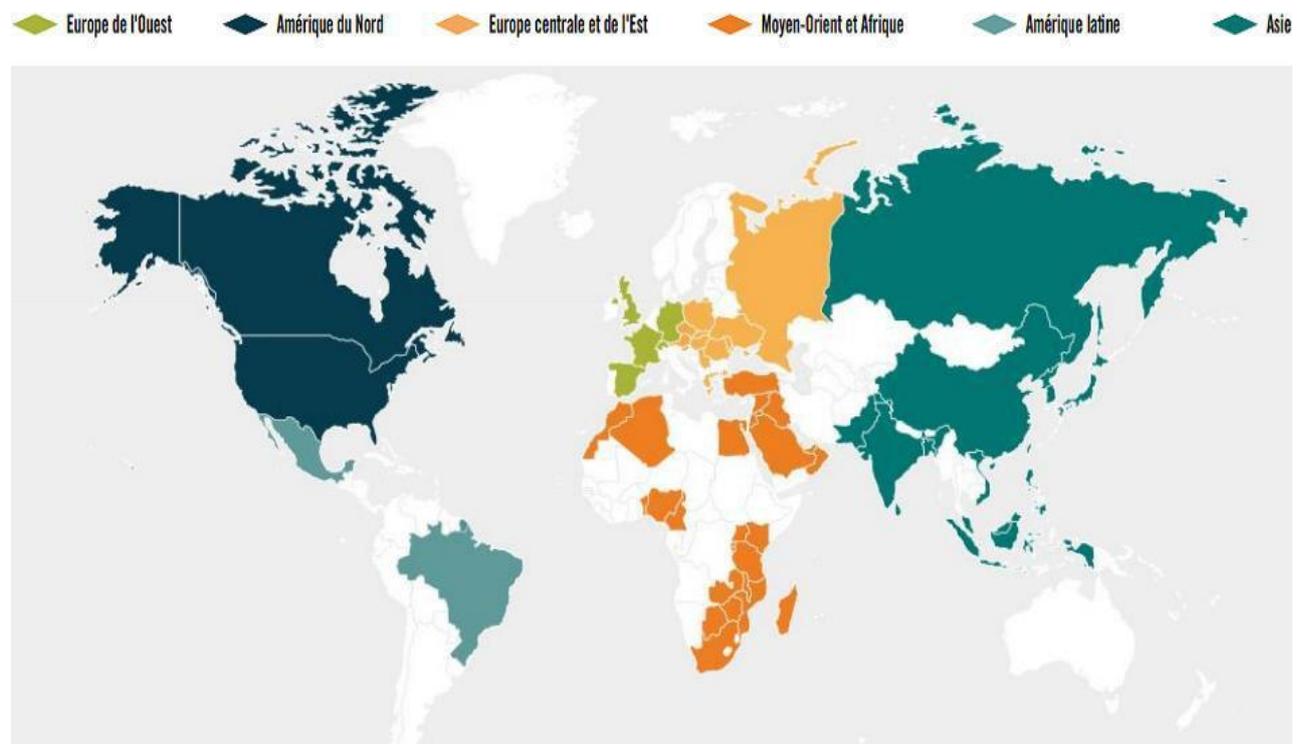


Figure 1 : Implantation industrielles de Lafarge dans le monde

3) Lafarge-Maroc :

3.1) Historique :

C'est à partir de 1912 que le ciment commençât à être utilisé au Maroc, d'abord pour certaines réparations, puis pour les constructions principalement à Casablanca. La construction du port de Casablanca nécessita des quantités importantes de ciment, qui était à l'époque importé.

C'est alors que fut décidée en 1913, l'implantation de la première cimenterie à Casablanca avec une capacité de production annuelle de 10 000 tonnes.



L'accroissement des besoins nationaux en ciment a engendré l'extension de l'usine de Casablanca et la création de nouvelles unités. La cimenterie de Casablanca a renforcé son potentiel de production pour atteindre les 19 000 tonnes par an en 1949 :

- Création d'une nouvelle usine à Agadir en 1952 avec une capacité de production de 60 000 T/ an.
- Démarrage de la cimenterie de Meknès en 1953 avec un nominal de production de 150 000 T/an.

Dans le Nord du pays, deux unités ont vu le jour à Tanger en 1953 (60 000 tonnes / an) à Tétouan en 1954 (86 000 T / an)

C'est ainsi qu'à la veille de l'indépendance, le niveau de production du ciment au Maroc approchait les 850 000 tonnes. Alors que, de nos jours, le Maroc produit environ 700 000 T/ an, assurant ainsi son autosuffisance depuis 1982.

Ce résultat exemplaire a été obtenu grâce à la conjugaison des efforts des secteurs privés et publics pour doter le pays d'une industrie cimentier capable de faire face aux besoins croissants du Maroc dans tous les domaines de construction : (l'habitat, les travaux publics, l'infrastructure sociale, touristique, agricole...).

Mais la naissance officielle de « Lafarge Maroc » a eu lieu le 01 Juin 1995, lors de la signature d'une convention de partenariat entre SNI (Société Nationale d'Investissement) et Lafarge qui aboutit à la création d'un Holding (50% LAFARGE et 50% SNI), mais notons que la SNI est achetée par ONA donc (50%LAFARGE et 50%ONA). La première conséquence de ce partenariat pour l'entreprise, est de pouvoir disposer d'une structure financière forte.

Récemment, Lafarge Maroc a occupé la place de leader sur le marché et notons que l'activité essentielle de Lafarge est issue de la production de ciment (85% des ventes de l'entreprise)..

3.2) Implantation :

- **1930** : Lafarge s'implante au Maroc avec ouverture de la 1ère cimenterie du pays à Casablanca
- **1953** : Création d'une 2ème cimenterie à Meknès
- **1992-1994** : Déploiement de l'activité :
 - 2cimenteries dans le Nord (Tétouan et Tanger)



- 1 usine de plâtre à Safi
- 9 centrales à béton

- **1995** : Signature d'une convention de partenariat avec SNI/ONA.
- **1997** : Construction d'une nouvelle ligne de production de ciment à Bouskoura.

- **1998** : Acquisition de Gravel Maroc 2003 Un nouvel atelier de dalles de plâtre au Maroc.
- **2003** : Construction d'un nouvel atelier de dalles de plâtre au Maroc à Safi
- **2004** : Début de la construction d'une nouvelle ligne de production à Bouskoura (900000 T).
- **2005** : Inauguration du parc éolien de la cimenterie de Tétouan.
- **2006** : Inauguration d'une nouvelle ligne de production de plâtre à L'usine de Safi.
- **2008** : Remplacement du refroidisseur du four 1 et augmentation du débit à (1900 t/j).

4) Holcim :

Holcim a été fondée en 1912 sous le nom de «Financière Glaris Ltd», dans le village d'Holderbank du canton d'Argovie. Particulièrement vite, ils se sont rendu compte que le marché intérieur n'offrait pas de grandes opportunités d'expansion pour l'entreprise. **1920** : Au début des années 1920, la société a commencé à investir dans des affaires de ciment dans d'autres pays européens. Cette tendance a été rapidement suivie par des investissements en Égypte, le Liban et l'Afrique du Sud. **1945** : Dans les années d'après la guerre et spécifiquement dans les années cinquante et les années soixante, un réseau d'holding a commencé à se développer au Nord et en Amérique Latine. **1970** : Dans les années 1970, l'entreprise couvre vers les marchés émergents de l'Asie-Pacifique. **1980** : Holcim continue à s'étendre vers de nouveaux marchés, y compris l'Europe de l'Est. Holcim devient alors leader au niveau mondial. **1990 - 2006** : Le nom du groupe Financière Glaris Ltd "Holderbank" a été changé en «Holcim Ltd» en mai 2001. Actuellement, la présence mondiale de Holcim consiste en un mélange équilibré de sociétés dans des marchés émergents et industrialisés. **1993** : La EPA (Agence américaine pour la tutelle environnementale) fait payer à Holcim de Holnam Holly Hill (en Caroline du Sud) une sanction de 838.850 pour ne pas avoir respecté les limites sur les émissions en atmosphère. **1994** : La Holcim de Clarksville (Missouri), ayant commencé à brûler des détritux dangereux en 1986, doit payer 100.874 en sanctions. **1999** : Les inspecteurs fonctionnaires de l'État de Iowa (États-Unis) détectent que Holcim n'a pas signalé avoir dépassé les limites d'émissions en atmosphère. **2000** : La société a eu une amende pour un chemin



dans l'établissement de Laporte (Colorado).2007 : Holcim compte 90.000 employés et est présente dans plus de 70 pays à travers le monde.

Le 19 aout 2008, dans le cadre de son plan de nationalisation de l'industrie du ciment[2], le président vénézuélien, Hugo Chavez, Holcim a conclu un accord de cession de ses filiales vénézuéliennes.

5) Fusion entre groupe Lafarge et Holcim :

Lafarge et Holcim ont annoncé leur projet de fusion entre égaux qui donnera naissance au numéro un mondial du ciment. L'opération, approuvée à l'unanimité des conseils d'administration des deux groupes prendra la forme d'une offre publique d'échange initiée par Holcim, à raison d'une action Holcim pour une action Lafarge. Voici le nouveau géant mondial des matériaux de construction: les deux principaux producteurs mondiaux de ciment unissent leur destinée. Le groupe français Lafarge fusionne avec le suisse Holcim. La transaction effectuée via un échange d'actions, donnera naissance au géant Lafarge Holcim, basé en Suisse.

La finalisation de la transaction est attendue au premier semestre 2015.

Des cessions d'actifs auront lieu, représentant 5 milliards d'euros des chiffres d'affaires.

6) Les activités de LafargeHolcim :

Les activités de LafargeHolcim sont ramenées dans le tableau suivant :

	Activités	Implantation
Lafarge Ciments	Production du ciment : - CPJ 35, CPJ 45, CPA 55. - Super blanc CPJ 45.	3 usines : - Ouest Casablanca. - Centre : Meknès. - Nord : Tanger et Tétouan.
Lafarge Bétons	Fabrication de Béton prêt à emploi.	12 centrales à béton : Casablanca, Berrachid, Rabat, Salé, Tanger, Larache, Meknès et Jadida.
Lafarge plâtre	Fabrication : - De plâtre de construction, de moulage et de moulage industriel.	Une usine à Safi avec deux fours d'une capacité de 800000t. Une presse à carreaux et un



	<ul style="list-style-type: none">- De carreaux de plâtre standards hydrofuges.- De dalles pour plafond.	carrousel pour dalles de plafond.
Gravel Maroc	Cette unité de granulats vient en appui au dispositif Béton	située à Khayayta Berrechid
Chaux	Fabrication de <ul style="list-style-type: none">- Chaux vive en roche- Chaux vive moulue en vrac- Chaux vive hydratée en vrac	Sur le site de l'ancienne cimenterie de Tétouan

Tableau 2 : Activités de LafargeHolcim

II) L'usine de Meknès :

1) Présentation LafargeHolcim-Meknès :

L'usine de Meknès est la 2ème cimenterie, en terme de capacité, du Groupe Lafarge Maroc. Elle y occupe une position majeure grâce à sa situation géographique.

1.1) Site de LafargeHolcim de Meknès:

L'usine de Meknès se trouve à 8 km à l'est de Meknès, et à 54 km à l'Ouest de Fès.

L'usine est située sur la commune urbaine d'Ouisslane. Et la carrière, qui se trouve à 5 km de l'usine, est située sur la commune rurale de Dkhissa.

La région au tour de l'usine a connu un développement urbain très important, ce qui induit une sensibilité importante à l'environnement.

Le plateau de Meknès se présente comme étant un carrefour de routes entre le Moyen Atlas au Sud et la plaine du Sebou et le Gharb au Nord et une zone de transition entre la plaine du Saïs, la ville de Fès et l'Oriental à l'Est et la région de Rabat à l'Ouest. Voir la figure 3.



Figure 3 : Vue de LafargeHolcim par satellite Google Map

Capacités et réserves :

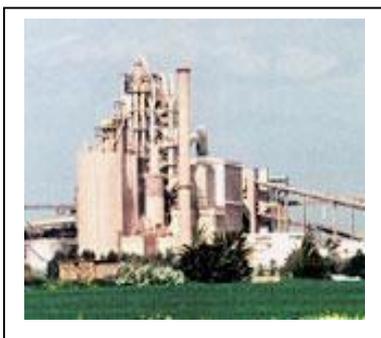
Capacité clinker : 998000 t /an

Capacité équivalente ciments : 1400000 t/an

Capacité broyage ciments : 1908000 t/an

Réserves calcaire : 10 ,5 t/an.

2) Dates et chiffres clés de l'usine:



1953 : Démarrage du premier four, en voie humide, 400 t/j

1971 : Extension des capacités avec l'installation d'un nouveau four de 650 t/j et augmentation de la capacité broyage ciment à 650.000 t.

1978 : Nouvelle extension du broyage ciment

1985 : Conversion du four 1 en voie sèche avec installation d'un mini-précalcinateur



1993 : Nouvelle extension avec démarrage d'une seconde ligne de cuisson d'une capacité de 1.200 t/j clinker.

*Substitution du combustible solide (charbon et coke de pétrole) au fuel.

*Installation d'un nouveau broyeur à ciment.

*Montage d'un filtre à manche en aval du four pour protéger l'environnement.

*Modification du précalcinateur four pour protéger l'environnement.

*Mise en service d'un nouvel atelier de broyage en collaboration avec la société PLYSIUS avec une capacité de 100 tonnes par heure.

1998 : Modification du précalcinateur du four 1

2001 : Installation d'un nouveau broyeur ciment portant la capacité de l'usine à 1.750.000 t

2002: Certification ISO 14001.

2004 : l'usine démarre l'utilisation d'un autre combustible: les pneus.

2005 : Lancement d'une nouvelle organisation Usine/Secteur.

*Annonce du développement des compétences de fabrication.

*Certification ISO 9001.

3) Caractéristique de l'usine:

3.1) Equipements:

- 2 lignes de cuisson en voie sèche avec conduite entièrement automatisée pilotée par un système expert ;
- 3 broyeurs ciment d'une capacité totale annuelle de 1.750.000tonnes.
- laboratoire d'analyse permettant d'assurer une logique de contrôle qualité aux différentes étapes de la fabrication.
- Stockage ciment : 7silos d'une capacité totale 22.000 t
- Atelier d'expédition sac et vrac.
- embranchement particulier à la voie ferrée.



3.2) situation juridique:

Dénomination : LAFARGE CEMENTS (Usine de Meknès)

Siège social : Km8, route de Fès, BP : 33Meknès

Standard : 52-26-44/45/46

Fax : direction usine : 54-92-94

Service technique : 54-93-07

Service commercial : 54-93-05

Nature Juridique : Société anonyme.

Capital social : 476 430 500DH

Répartition du capital : LAFARGE 50% ONA 50%

Produits fabriqués : Ciment portland avec ajouts CPJ45 en Sac et en vrac. Ciment portland avec ajouts CPJ35 en sac.

Effectif du personnel : 331, répartis de la façon suivante:

✚ Cadres	19
✚ Agents de maîtrise supérieurs	13
✚ Agents de maîtrise moyens	14
✚ Agents de maîtrise simples	29
✚ Employés	23
✚ Chefs d'équipe	37
✚ Ouvriers qualifiés	119
✚ Manœuvres	17



3.3) Organigramme de LafargeHolcim Meknès :

Service de fabrication:

Ce service est chargé de la conduite des installations à fin de produire une matière de qualité, et ceci un planifiant des arrêts pour l'entretien, l'optimisation des performances, l'analyse des dysfonctionnements et dans un but global de réduire le coût de production.

Service Procédés systèmes:

Il a pour tâche principale l'optimisation des procédés/performance par l'analyse des dysfonctionnements process, le suivi des indicateurs de performance, les consignes process, l'audit et la proposition des améliorations ainsi que la gestion par l'informatique industrielle (SC C/ Luice / IP 21).

Service bureau de méthodes:

Se charge de l'organisation et l'optimisation de la maintenance. Cette mission est réalisée par l'intermédiaire de visite et diagnostique des installations, suivi de l'état des équipements, préparation des travaux, planification de l'opération des entretiens, gestion des pièces de rechange, optimisation des coûts.

Service maintenance mécanique:

A pour mission principale la réalisation des procédures de travail, de l'organisation des équipes et de la qualité d'exécution.

Il veille ainsi au respect du rapport Coût / Budget et de la sécurité / Environnement.

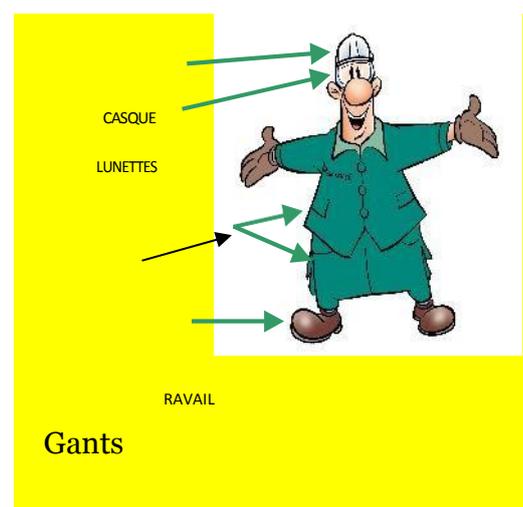
Service maintenance électrique:

Se charge de la réalisation des opérations d'entretien électrique. Il est garant de la fiabilité électrique et des instrumentations, des procédures de travail, de l'organisation des équipes, de la qualité d'exécution.

Service sécurité:

Il est le moteur pour la réalisation et

l'encadrement de l'effectif de l'usine pour produire un ciment avec un objectif de zéro accident il a pour mission l'animation de la sécurité, le soutien de la hiérarchie en matière





de sécurité, l'animation d'un comité de sécurité usine, instauration des procédures de sécurité, le reporting sécurité et la gestion du réseau sécurité inter usines.

✚Service finance gestion:

Ce service a pour mission la gestion de la comptabilité générale et analytique dans le but d'assurer une conformité à la réglementation et la législation. Pour se faire le service assure la gestion des procédures comptables, fiscales et financières, la gestion des processus budgétaires, la consolidation reporting, l'analyse des coûts ainsi que la gestion du patrimoine foncier avec le siège.

✚Service ressources humaines:

Ce charge de la gestion des ressources humaines, et plus précisément la gestion administrative du personnel non cadre, l'application de la législation du travail, la gestion des relations avec les représentant du personnel, l'instauration d'un bon climat social, l'établissement des plans de formation et l'assurance d'une parfaite communication interne.

✚Service formation:

Ce service a pour mission la formation du personnel de l'usine, allant de simples ouvriers Jusqu'aux cadres. Il trace comme objectif la contribution et la réalisation des projets de formation pour le développement des capacités professionnelles.

I) Description de la chaine de la production

1) Définition de ciment:

Le ciment est un lien hydraulique constitué d'une poudre minérale, d'aspect grisâtre, obtenue par broyage et cuisson à 1450 °C d'un mélange de calcaire et d'argile.

Le produit de la cuisson, appelé clinker, forme une combinaison de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde ferrique comme indique le tableau suivant :

Nom	Symbole chimique	Notation Cimentière	Masse molaire
Oxyde de Calcium ou Chaux vive	CaO	C	56
Oxyde de silice ou silice	SiO ₂	S	60
Oxyde d'Aluminium ou Alumine	Al ₂ O ₃	A	102
Oxyde de Fer	Fe ₂ O ₃	F	160

Tableau 3 : Produit de cuisson

Le ciment résulte du broyage de clinker et de sulfate de calcium ajouté généralement sous forme de gypse. Il forme avec l'eau une pâte plastique faisant prise et durcissant progressivement, même à l'abri de l'air, notamment sous l'eau.

Les constituants anhydres, présents sous forme de cristaux polygonaux assez réguliers et homogènes, se combinent à l'eau et se décomposent. En s'hydratant, ils recristallisent, prenant des formes très variées : Aiguilles, bâtonnet, prismes, divers...

Ces cristaux adhèrent aux adjuvants granuleux du béton : sable, gravier, cailloux c'est l'hydratation qui constitue le ciment. La figure suivante (Figure 4) résume les éléments qui entre dans la constitution du ciment :



Figure 4 : Composition de ciment

2) Différent type de ciment :

LafargeHolcim MAROC s'intéresse à la fabrication des trois catégories de ciments, à savoir CPJ35, CPJ45 et CPA55 (Figure 5). Concernant le ciment blanc, le groupe l'importe sous forme de matière cuite (clinker) pour être broyé et mit en sacs en vue de son expédition.

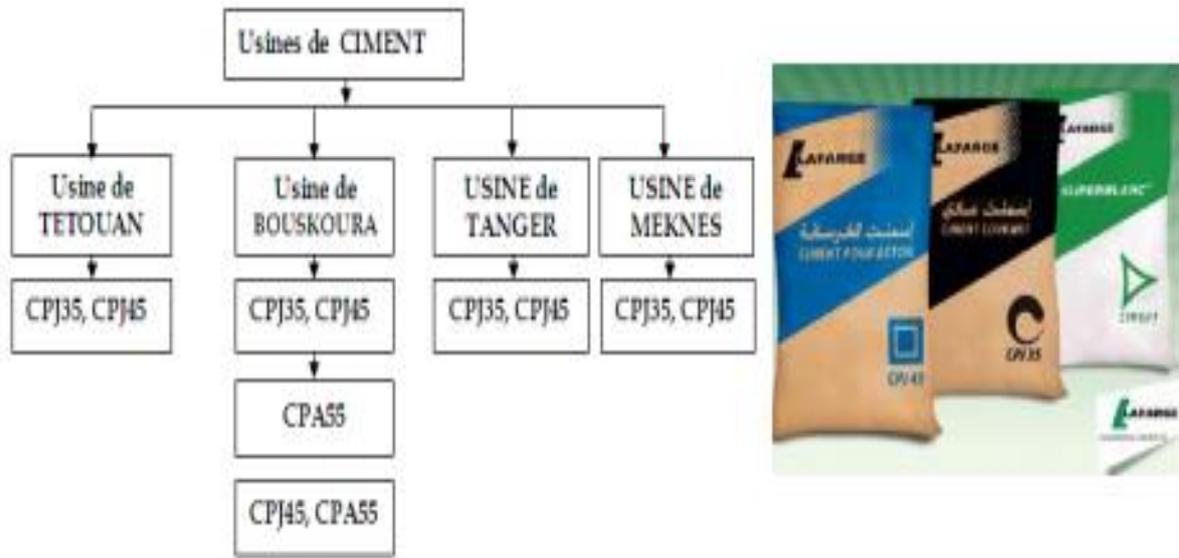


Figure 5 : Différent type de ciment de ciment

En outre, les trois types de ciments (CPJ35, CPJ45, CPA55) se différencient selon des pourcentages précis des ajouts au clinker (Tableau 4).

Ciments	CPJ35	CPJ45	CPA55
Compositions			
Calcaire	35.60%	24.00%	0.00%
Cendres volantes	3.21%	6.52%	0.00%
Gypse	2.80%	3.14%	5.64%
Clinker	58.39%	66.34%	94.36%

Tableau 4 : différent type de ciment selon le pourcentage d'ajout de clinker

II) Les étapes de fabrication de ciment :

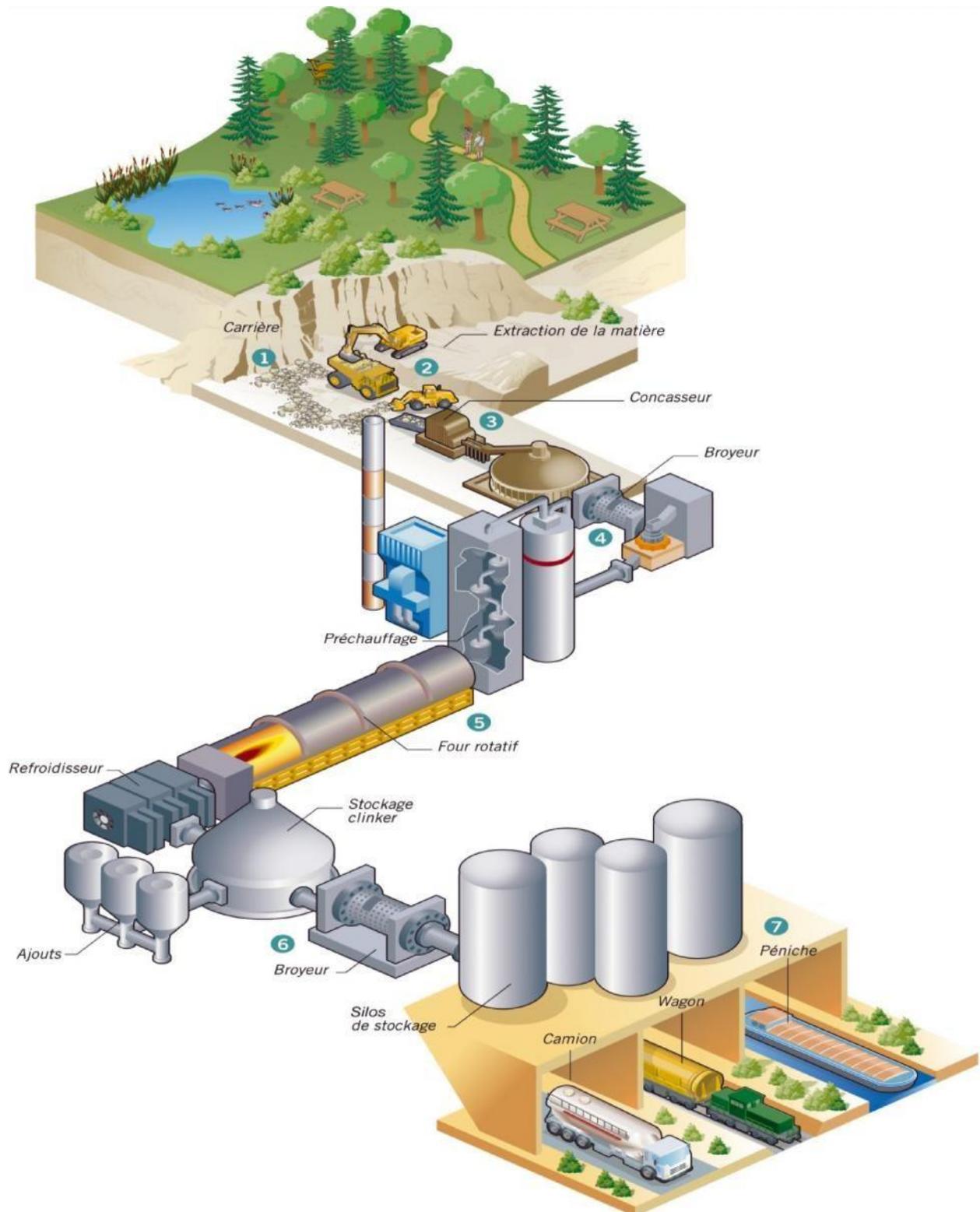


Figure 4 : Processus de la fabrication de ciment



1) Abattage et concassage :

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses (front de taille), par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique. En suite transportées par des camions (de la société sous-traitante) vers un atelier de concassage qui permet la réduction de la taille de la matière première à une granulométrie inférieure à 0mm,8 puis acheminée vers l'usine à l'aide des bandes transporteuses.

LAFARGE-Ciments usine de Meknès dispose de deux ateliers de concassage équipés de crible à disques

- > Concasseur HAZEMAG, assurant un débit : 900 t/heure
- > Concasseur FCB, assurant un débit : 400t/heure

2) Préparation de cru :

Le cru est la matière brute avant la cuisson. Une grande partie du cru est contrôlée par une tour d'échantillonnage intercalée entre la carrière et les stocks de pré homogénéisation.

❖ Echantillonnage

L'échantillonnage sert à contrôler la qualité et la quantité de cru mise en stock et d'en assurer le dosage parfait.

Pour échantillonner les matières premières en provenance de la carrière, l'usine de Meknès est équipée d'une tour d'échantillonnage de type ITECA à 4 étages.

❖ Pré-homogénéisation

La matière brute est échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires. Le mélange est ensuite réalisé dans un hall de pré homogénéisation où la matière est mise sous forme de couches horizontales superposées.

La reprise de la matière est faite verticalement à l'aide d'un héra et par gratteur assurant la régularité de la matière envoyée à l'usine par tapis transporteuses.

La Composition normalisée du cru est :

- Carbonates de calcium (CaCO_3) de 77 à 83%
- Silice (SiO_2) : de 13 à 14 %
- Alumine (Al_2O_3) : de 2 à 4%
- Oxyde ferrique (Fe_2O_3) : de 1,5 à 3%

L'usine dispose actuellement de deux halls de pré homogénéisation de capacité 36000 tonnes chacun.

❖ Broyage cru



Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être broyées très finement (quelques microns) pour donner ce qu'on appelle : Farine. Avant le broyage de la matière, une correction est souvent nécessaire en ajoutant des éléments secondaires.

L'usine de Meknès dispose de deux broyeurs de crus verticaux à trois galets. La capacité nominale de broyage est de 300 t/h chacun.

❖ Homogénéisation

Deux silos d'homogénéisation assurent le mélange et le stockage de la farine avant la cuisson. La farine est acheminée au silo d'homogénéisation par des systèmes aéro-glissières. Ainsi on a 2 silos type IBAU de capacité.

3) Cuisson de la farine :

La cuisson du cru est l'opération fondamentale de la préparation du ciment, elle nécessite les installations suivantes :

➤ Tour de préchauffage

Dans la tour de préchauffage, la farine circule par gravité le long de cinq cyclones à contrecourant des gaz (provenant du four) d'une température de 800 °C.

➤ Four rotatif

La cuisson de la farine est l'opération qui permet d'obtenir le clinker, elle se fait à une température voisine de 1450°C dans un four rotatif et cylindrique tournant de 1,5 à 3 tours/minute. L'usine dispose de deux fours rotatifs légèrement inclinés :

- Four I : avec une capacité de production de 140t/h.
- Four II : avec une capacité de production de 90t/h.

➤ Refroidisseur

A la sortie des fours, le clinker est trempé dans deux refroidisseurs à grilles par soufflage d'air.

4) Broyage de clinker :

Avant de se transformer en ciment le clinker passe par les opérations suivantes :

➤ Broyage

Le clinker est broyé dans un broyeur à boulets (disposé horizontalement) avec des ajouts de matières secondaires (calcaire, gypse...). L'atelier de broyage est équipé de trois broyeurs à boulets nommés BK3, BK4 et BK5.

En général, le broyage est plus facile quand le clinker possède plus de C3S, moins de C3A et le plus possible de petits cristaux

Le broyage a pour but de réduire la taille des grains du clinker et de procéder à l'ajout de gypse (régularité de quelques propriétés du ciment : temps de prise et durcissement) La figure ci-dessous illustre les opérations effectuées lors du broyage du clinker.

➤ Ensachage

L'ensachage du ciment consiste à emballer le ciment dans des sacs. La livraison du ciment se fait soit en sacs, soit en vrac (transport par la route).

Pour ceci, l'usine dispose de 3 ensacheuses rotatives (Haver), disposées selon le tableau suivant :

Type de machine	Débit t/h	N° silo	Capacité des silos	Type ciment
Haver n° 1	90	1 ou 2	Silo1 : 5000 t	CPJ 35
Haver n° 2	90	1 ou 2	Silo2 : 5000 t	CPJ 35
Haver n° 3	90	1 ou 7	Silo 7 : 5000 t	CPJ 45

Tableau 5 : Liste des machines d'ensachage

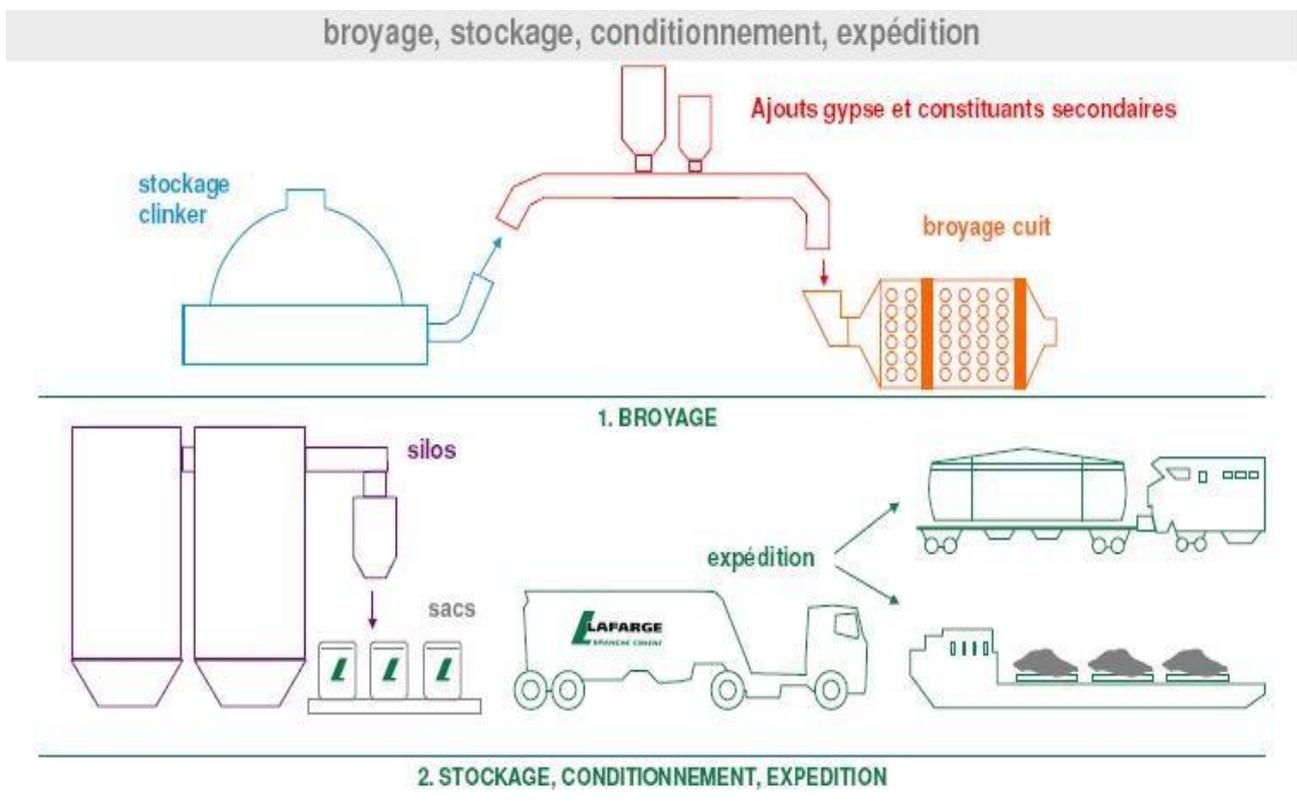


Figure 5 : Broyage clinker, stockage, conditionnement et expédition



Partie II :

THÉORIE DE FILTRATION



I) Introduction :

La filtration est le procédé de rétention de particules contenues dans un fluide donné. Dans le milieu industriel, elle succède le plus souvent et directement le dépolluage des machines, qui, en tant que tel, peut être fait pour plusieurs raisons.

En effet, il est parfois opéré dans le but de récupérer de la matière déjà traitée et constituée de particules assez fines. Il peut aussi être réalisé et même dans la plupart des cas à des fins purement environnementales afin de réduire les émissions dangereuses pour l'atmosphère.

Quel que soit l'objectif visé, les méthodes utilisées laissent paraître le même principe de la captation de la poussière dans un support de transport qui est ici un flux d'air. Il est toutefois important de savoir que la vitesse de ce dernier influe sur la taille des particules entraînées à partir du point d'attraction pouvant être ou non soumis à la pression atmosphérique.

Les principaux éléments qui déterminent les conditions de dépolluage sont donc:

- la vitesse du flux d'air attractif dépendant du ventilateur de tirage et de la dimension de la tuyauterie du collecteur,
- les caractéristiques physico-chimiques (composition, température, grosseur des particules) de la matière à recueillir,
- la pression au point de prise de la matière.

II) Présentation des éléments de dépolluage :

1) Filtre à manche :

On désigne sous ce nom des dépollueurs dans lesquels les fumées chargées de poussières vont traverser une couche filtrante sur laquelle les particules vont se déposer. Contrairement à ce qui se passe dans les séparateurs de type cyclonique ou dans les laveurs, dans lesquels les particules sont éliminées en continu, ici il y a accumulation et les poussières doivent périodiquement être séparées par un procédé de nettoyage.

La couche filtrante peut être constituée de :

- ✚ de média tissé ;



- ✚ de fibres en vrac ou de feutres ;
- ✚ de membranes poreuses, le plus souvent accolées à un support ;
- ✚ de papiers filtrants.

Les filtres peuvent être à *haute efficacité*, et utilisés dans le nucléaire et dans les salles blanches, ou bien d'*efficacité normale*. Dans le premier cas, les poussières accumulées sont souvent éliminées avec le média filtrant lui-même, car on change des cassettes entières, alors que, dans le second cas, les supports filtrants durent plusieurs années. De plus, dans le cas d'un filtre à haute efficacité, on est presque toujours amené à protéger le filtre par un pré-filtre, de façon à limiter la fréquence de changement des médias. Cette classe de séparateurs a connu depuis les années 1970 un développement rapide car, en matière d'efficacité absolue, on a là un des meilleurs équipements, qui, de plus, est relativement facile à entretenir et assez peu cher à l'investissement.

Les filtres à manches constituent une sous-famille de la classe des séparateurs à couche filtrante, parmi lesquels on trouve aussi les filtres à gravier, les filtres céramiques et les filtres en métal fritté.

Dans un filtre à manches, les fumées chargées de poussières sont passées à travers un média filtrant qui va retenir les poussières.

1.1) Technologie :

Le média filtrant est en général agencé en manches constituées de grandes chaussettes de tissu ou de feutre, d'une longueur variant entre 3 et 6 m et d'un diamètre de 150 mm environ. Ces manches sont en général suspendues par le haut. Il existe d'autres types de manches et d'autres arrangements, mais le principe reste le même. Les gaz sont alimentés par le bas et à l'intérieur des manches, traversent les manches et sont évacués par la partie haute. Les poussières sont donc collectées à l'intérieur des manches. Rien n'oblige à avoir un tel arrangement et il est parfaitement possible d'avoir des filtres dans lesquels les poussières sont collectées à l'extérieur, ou bien dans lesquels les gaz circulent de haut en bas.

La surface filtrante est constituée par la somme des surfaces de chaque manche. La surface effective, elle, ne prend en compte que la surface active à un moment donné. En effet, pour les grosses unités, il est commun de subdiviser le filtre en compartiments et on peut très bien avoir un compartiment inactif à un moment donné.

La vitesse de filtration s'obtient en divisant le débit effectif par la surface active. Cette vitesse est en général assez faible et comprise usuellement entre 0,01 et 0,1 m/s.



Un dispositif de nettoyage par contre-soufflage de gaz, par secouage mécanique ou par une impulsion d'air sous pression à contre-courant est toujours présent.

Les solides collectés tombent dans une trémie et ont évacués par des vis, des écluses ou des sas rotatifs. Les facteurs importants jouant sur l'efficacité ou le design des filtres sont passés en revue ci-après.

1.2) Perte de charge:

La perte de charge dépend de la nature du média filtrant et de ce qui est collecté. Elle varie en fonction du temps car on accumule les poussières entre deux nettoyages. Comme les poussières sont plus ou moins compressibles, la perte de charge ne varie pas de manière linéaire en fonction du temps.

1.
L'équation suivante traduit le fait que la perte de charge est constituée de deux facteurs, l'un lié au média :

$$\Delta p = \mu(k_1 c v^2 + k_2 v)$$

Avec :

- + c : concentration de poussières
- + v : vitesse de filtration
- + k_1 et k_2 : constantes liées aux poussières et au média respectivement.

On peut alors écrire que la dépendance de la perte de charge à la vitesse suit une loi empirique de la forme :

$$\Delta p = K v^n$$

Avec n exposant compris entre 1,3 et 1,6 selon les applications.

En pratique, on va accumuler les poussières jusqu'à ce qu'une perte de charge prédéterminée soit atteinte, ou bien à intervalles préfixés. Après un décolmatage, la perte charge redescend à une valeur basse et le cycle reprend.

La figure 6 établie par simulation à l'aide d'un programme commercial montre un profil type.

La perte de charge est usuellement comprise entre 300 Pa (dépoussiérage pur) et 2 500 Pa (dépoussiérage associé à l'élimination de polluants acides).

Notons que l'on n'a pas spécialement intérêt à opérer à trop faible perte de charge, car une certaine couche de poussières présente en permanence protège le média contre un encrassement à cœur par pénétration des poussières. En sus, un décolmatage trop violent use prématurément les manches.

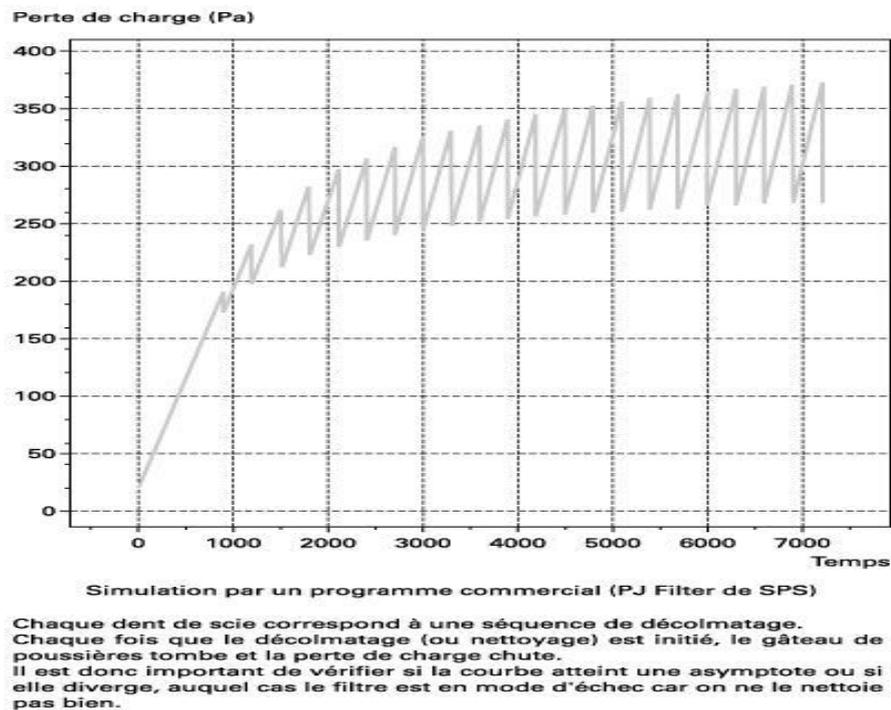


Figure 6 : Variation de perte de charge d'un filtre à manches.

1.3) vitesse de filtration:

La vitesse de filtration est un élément essentiel, elle est très liée au média filtrant utilisé et à l'application. L'absence de théorie suffisamment avancée oblige à sélectionner cette vitesse à partir d'expériences ou de ce qui se fait déjà. Toutes choses égales par ailleurs, une augmentation de la température doit conduire à abaisser la vitesse retenue car la viscosité du gaz augmente. De même, des particules plus fines que celles de référence doivent conduire à abaisser les vitesses. Les autres facteurs affectant la vitesse de filtration sont le mode de décolmatage (air pulsé ou secouage). Il est faut noter qu'il est aussi indispensable de se référer au vendeur du média.

1.4) Nature du media:

Plusieurs types de fibres sont disponibles sur le marché. Les critères de sélection seront donc de deux natures : technique et économique. Il n'y a plus guère d'applications pour les fibres naturelles, comme la laine, le lin et le coton. Du point de vue chimique, on retiendra qu'il faut prendre en compte la résistance aux agents oxydants (oxygène de l'air et oxydes d'azote), aux acides et aux bases. La résistance à la température est capitale. Il faudra distinguer entre la température en marche normale et la température qui peut être atteinte lors de pointes.



Le mode de confection d'un média peut être de trois types, les tissés, les feutres et les aiguilletés. Le tissu classique, employé presque exclusivement jusque dans le début des années 1970, a tendance à perdre du terrain face à l'aiguilleté. Plusieurs types de tissage, symétriques ou asymétriques sont proposés. L'incidence sur les propriétés dépasse le cadre de cet article, mais il y a des effets marqués sur la résistance à la déchirure.

2.
Les feutres aiguilletés sont obtenus par l'insertion, dans une grille de fibres, d'une masse de fibres élémentaires comprimées mécaniquement, sans recours à un produit liant. Les feutres aiguilletés peuvent être fabriqués à partir de n'importe quelle qualité de fibres. Les feutres classiques ne sont plus guère utilisés à cause de leur manque de souplesse.

On a tendance à préférer les tissés quand le nettoyage se fait par secouage ou par flux d'air inversé. Pour le nettoyage par air pulsé, on utilise presque exclusivement les aiguilletés. Toutefois, chaque application étant assez spécifique, il n'est pas rare de voir des exceptions. Le tissu support de filtration a en général une épaisseur de 1,5 à 2 mm et une masse spécifique de l'ordre de 500 g/m².

3.
Les médias membranés, obtenus par placage d'une membrane poreuse aux gaz, connaissent un essor marqué malgré leur prix très élevé. Ils permettent en général des vitesses de filtration plus importantes et ne peuvent absolument pas s'encrasser à cœur. On ne peut pas dire que les médias chers comme le Téflon ont supplanté les matériaux meilleurs marché. Tout d'abord, même si la limitation en température reste sérieuse, on a souvent la possibilité de bipasser temporairement le filtre en cas de pic de température. La part importante du coût des manches dans un filtre par rapport au total pousse toujours à rechercher le média le moins cher.

La fibre de verre, pour cette raison, avec ses excellentes propriétés de tenue aux acides et aux bases, même si, sauf si elle est utilisée sous forme de membrane, elle a des caractéristiques de filtration moins bonnes que certaines fibres synthétiques, reste très utilisée. La figure 7 donne un exemple de deux types de médias

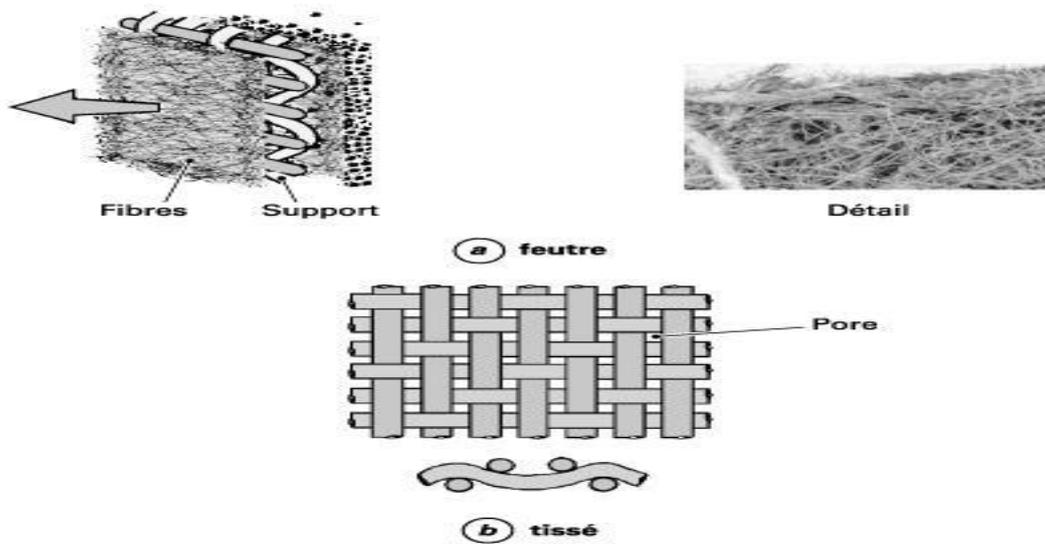


Figure 7 : différents medias de filtration

1.5) Avantages et inconvénients:

✚Avantages :

- Performances élevées quelque soit la concentration en entrées ce qui en fait un choix incontournable pour les biomasses à fortes émissions particulières.
- Encombrement moindre qu'un électro-filtre, peut s'adapter sur toutes puissances dès 300 kW.
- Montant fortement dépendant de la température des fumées et donc devient très concurrentiel en cas d'installation après un économiseur.
- Simplicité des opérations d'exploitation (hors remplacement périodique des manches).

✚ Inconvénients :

- Sa sensibilité aux escarbilles, points chauds et froids des fumées, attaques chimiques.
- Sa forte perte de charge nécessitant d'augmenter sensiblement la puissance du ventilateur d'extraction.



- La consommation d'air comprimé est constante quelle que soit la taille du filtre.

1.6) Nettoyage:

Trois grands types de nettoyage des manches sont disponibles :

- ❖ le nettoyage par secouage .
- ❖ le nettoyage par contre -flux de gaz (ou air inverse) .
- ❖ le nettoyage par impulsion de gaz.

Le nettoyage peut, en sus, être fait pour chacune des catégories en ligne (*on line*) ou hors ligne (*off line*).

Le **nettoyage par secouage** (*shaking*) est historiquement le plus ancien mode de nettoyage des manches d'un filtre. Il faut voir, dans ce mode de nettoyage, une analogie avec le battage d'un tapis ménager pour en enlever la poussière. La partie supérieure des manches est accrochée à un dispositif mécanique qui va imprimer un mouvement vertical, horizontal, ou une combinaison des deux. L'assemblage mécanique est en général constitué par un système d'arbres et de cames. L'amplitude des vibrations est limitée de façon que deux manches ne puissent pas se toucher entre elles lors de l'opération et est de l'ordre de 20 à 50 mm. La fréquence de vibration est assez basse et comprise usuellement entre 4 et 8 Hz. L'incidence d'une augmentation de fréquence est plutôt bénéfique. La durée pendant laquelle ce secouage est appliqué est de l'ordre de 15 à 30 s. Le nettoyage par secouage présente les avantages d'une fatigue relativement limitée des manches, mais l'inconvénient associé à toute la mécanique du secouage, en particulier du point de vue de la maintenance. Appliqué en *offline* et à des médias tissés, ses performances en termes de dépoussiérage sont très bonnes, pour peu que l'on veille à ne pas travailler à des vitesses de filtration excessives.

Les filtres à **nettoyage par contre-flux** de gaz (*reverse air..*) doivent être compartimentés. Pendant le nettoyage, le flux de gaz dans un compartiment est stoppé et un gaz propre, qui peut être de l'air ou tout simplement le gaz que l'on vient de filtrer, est forcé, dans la direction opposée à celle de la filtration, à travers les manches. Le schéma de la figure 8, visualise l'opération pour deux compartiments, l'un en filtration, l'autre en nettoyage. Quand la captation des poussières est effectuée à l'intérieur des manches, ce qui est un cas fréquent, des anneaux de support évitant le repli complet

de la manche sur elle-même doivent être installés. On ne met pratiquement jamais de cages supports avec ce mode de nettoyage.

La durée du soufflage s'échelonne entre une demi-minute et plusieurs minutes. Le dispositif permettant d'inverser le sens de passage du gaz est soit un jeu de registres « tirant » du gaz déjà filtré, éventuellement avec l'aide d'un petit ventilateur, soit de l'air sec de l'extérieur. Il est alors conseillé de chauffer certains pour éviter des problèmes liés à la condensation d'humidité. D'une manière générale les filtres à contre-flux sont plus onéreux que ceux à secouage simple.

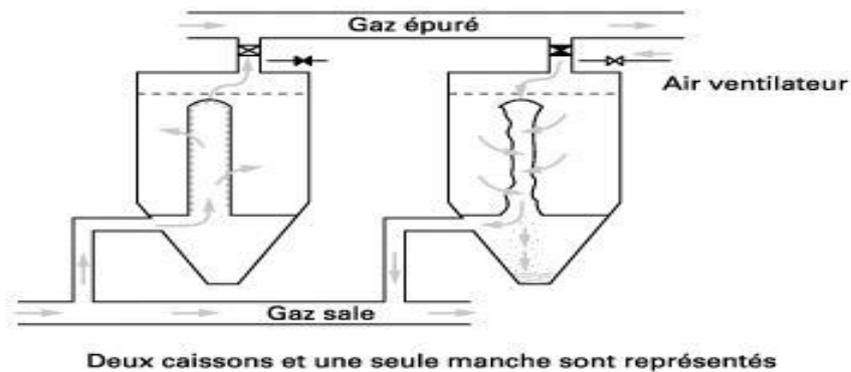


Figure 8 : Filtre à contre-soufflage.

Le nettoyage par **impulsion de gaz** (*pulse jet*) est d'une application plus récente et a connu un véritable essor avec l'apparition et la mise au point des feutres aiguilletés, les média tissés s'étant révélés peu adaptés à ce mode de nettoyage. Ils n'ont connu un redéveloppement qu'à partir des années 1960. Dans un dispositif à air pulsé, une impulsion d'air sous moyenne pression est délivrée à l'intérieur de la manche par le biais d'un orifice situé près de son extrémité ouverte. Le jet d'air sous pression, qui s'étend et se propage à l'intérieur de la manche, génère une onde de pression et une onde de déformation qui vont permettre au gâteau de poussières collecté de se décrocher. Au fur et à mesure de son expansion, le jet d'air entraîne de plus en plus de gaz vers la manche. Ce phénomène d'onde de choc et donc d'accélération locale pouvant atteindre quelques dizaines de g est largement dominant devant l'effet du flux d'air inverse qui en résulte. Le mode d'action est donc bien différent de celui qui précède. Dans ce type de filtre, les manches reposent sur des cages, et un réservoir est maintenu rempli d'air à une pression de 4 à 7 bars. Au moment du décolmatage, une vanne à ouverture rapide va laisser passer une impulsion d'air, représentant une dizaine de litres pendant une période de 100 à 500 ms, vers un orifice en général circulaire.



2) Le ventilateur :

La principale fonction du ventilateur est de créer un courant d'air.

Le filtre sujet de notre stage est lié à un ventilateur centrifuge dont le principe de fonctionnement est comme suit :

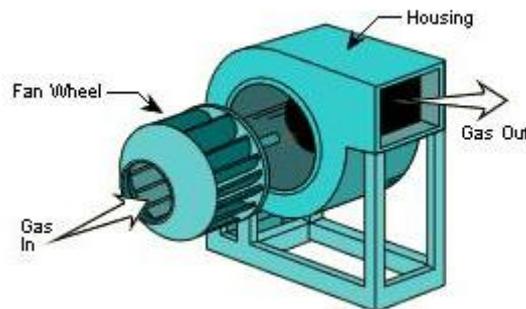


Figure 9 : Ventilateur centrifuge.

Un ventilateur centrifuge est constitué de deux parties principales : une roue à aube entraînée par un moteur, tourne dans un stator épousant la roue, ce stator comporte deux ouvertures, une alimente la partie centrale de la roue en fluide, lequel pénètre par dépression et est soufflé par effet centrifuge par le deuxième orifice.

Ce type de ventilateur permet d'atteindre une pression par accélération de l'air dans des roues à aubes en rotation puis par décélération dans les diffuseurs à large rayon de courbure.

Ces ventilateurs permettent une régulation modulée du débit d'air en maintenant une pression constante par simple action d'une vanne en aspiration.

La pression produite par un ventilateur est appelée la pression TOTALE (pt), elle est la somme de deux pressions distinctes : STATIQUE + DYNAMIQUE.

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d$$

- P_s = Pression statique. Ceci correspond aux frottements que l'air doit vaincre pour s'écouler dans le circuit aéraulique.



- P_d = pression dynamique. Pour simplifier, c'est la surpression nécessaire pour générer la vitesse de l'air dans le circuit aéraulique.

A noter que :

$$P_d = \frac{\rho \cdot V^2}{2}$$

Avec :

- ρ = masse volumique du fluide en kg/m³
- V = vitesse de refoulement du ventilateur.

3) Transporteur à bande :

3.1) Principe:

Un transporteur à bande (convoyeur a bande) a pour fonction de transporter en continu des produits en vrac Mélangés ou homogènes, sur des distances allant de quelques mètres à des dizaines de Kilomètres.

L'un des principaux composant du convoyeur est la dont la fonction est double :

- ✚ recevoir le produit transporté.
- ✚ transmettre la force nécessaire pour déplacer cette charge.

Les surfaces de la bande (supérieure sur le brin porteur et inférieure sur le brin de retour) sont en contact avec une série de rouleaux montés sur le châssis du convoyeur en un ensemble appelée station-support. A chaque un tambour, l'un d'entre eux étant relié à mouvement. Le convoyeur à bande présente les avantages support. A chaque extrémité du convoyeur, la bande s'enroule un tambour, l'un d'entre eux étant relié à un groupe d'entrainement pour transmettre

Le convoyeur à bande présente les avantages suivants :

- ✚ Grande Capacité de transport
- ✚ Souple à concevoir pour les environnements d'usine à espace réduit
- ✚ Nécessite une maintenance réduite
- ✚ Possibilité de transporter des produits très fragiles
- ✚ Réduction des besoins de traitement des poussières
- ✚ Réduction de la dégradation du produit
- ✚ La puissance nécessaire est faible par rapport au débit et à la longueur.

Selon les charges à transporter, les grands convoyeurs à bande peuvent représenter une économie de 40 à 60 % par rapport au transport routier. Les composants électriques et mécaniques des convoyeurs, tels que rouleaux, tambours, roulements, moteurs, etc. sont fabriqués dans le respect des normes les plus strictes.

3.2) Principaux composants du Transporteur de matière:

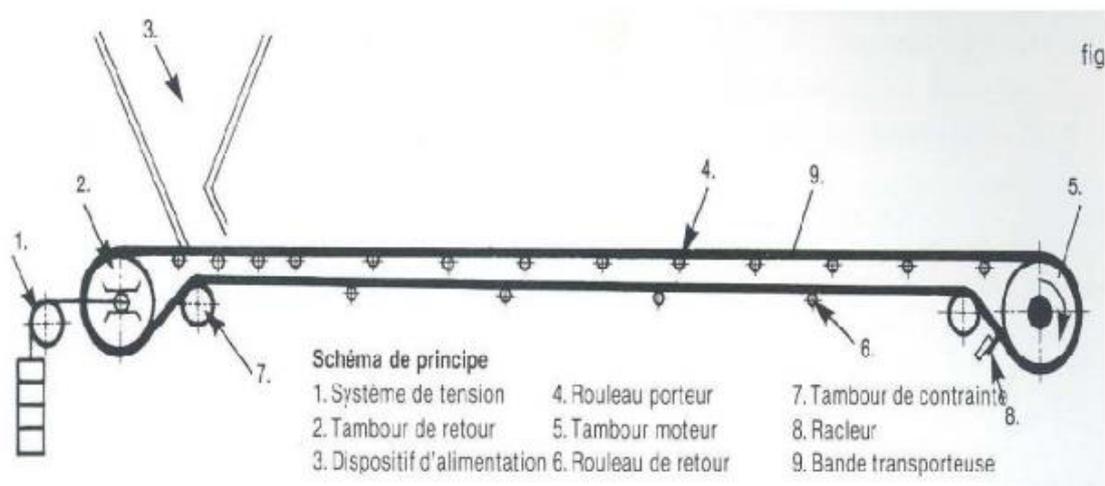


Figure 10 : .Transporteur de matière.

La Fig. 10 illustre les principaux composants d'un convoyeur à bande type horizontal.

Dans notre cas un capot aura une importance fondamentale pour protéger le produit transporté de l'air Ambiant et d'assurer le bon fonctionnement.

La bande transporteuse

La bande transporteuse en Caoutchouc est constituée de :

- La carcasse qui détermine la tension susceptible d'être appliquée.
- Le revêtement qui est en fonction du matériau transporté.

La carcasse a pour utilité de transmettre et d'absorber les efforts auxquels est soumis la courroie elle est composée de toiles textiles polyester en chaîne et polyamide en trame (EP)

Le revêtement protège la carcasse du produit transporté ainsi que les organes de convoyeur (Tambours, rouleaux).



+ Les tambours :

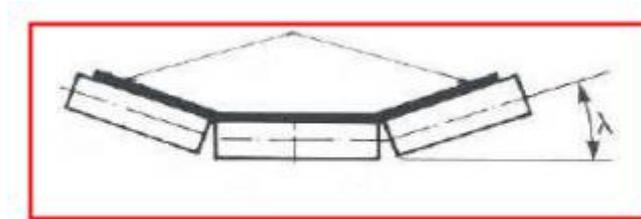
Fonction: entraîner la courroie ou l'amener à changer de direction. Celui de contrainte, il ramène le brin entrant ou sortant de la courroie en ligne avec le brin de retour ou crée l'angle d'enroulement voulu autour du tambour l'angle d'enroulement voulu autour du tambour d'entraînement.

+ Brin Porteur :

Le brin porteur peut avoir pour soutien :

- Une batterie à rouleaux formés en auge.
 - Une batterie à rouleaux plats.
 - Un support de glissement
- Batterie à trois rouleaux formés en ange :

Il est utilisé pour le transport de marchandises en vrac. La batterie à rouleaux enauge offre une grande capacité, faible risque de perte de matières, et un guidage efficace de la bande avec λ l'angle d'auge.



C'est le modèle que nous avons choisi, car lorsque les rouleaux sont de même longueur, la capacité optimale est obtenue à un angle d'auge de 45° . La distance entre les rouleaux est normalisée à max 10mm. Il est nécessaire de diminuer l'angle d'auge-lambda au fur et à mesure à l'arrivée de la chute de la matière afin de faciliter cette dernière.

- Batterie à deux rouleaux :

En général, cette batterie n'est s'utilisée qu'en cas de largeurs de bandes inférieures à 650 mm. Un angle d'auge supérieur à 25° n'est pas utile du fait des efforts exercés sur la bande.



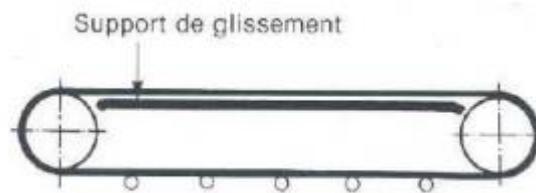


- Support de glissement :

Peut être utilisé pour transport de charges individuelles ou de produits en vrac.

Le support de glissement peut être réalisé en acier en tissu synthétique ou en bois dur.

On utilise normalement, sur la face inférieure de la bande des bandes à faible frottement en raison des forces de friction entre la bande et le support de glissements.



- ✚ **Brin de retour :**

Il est généralement soutenu par des batteries à rouleaux plats. Dans le cas de transporteurs de grande longueur, il peut être utile d'employer des batteries à deux rouleaux qui facilitent le guidage de la bande.

Pour le transport de matières collantes, on a recours à des rouleaux de retour pourvus de rouleaux de support ou de revêtement en caoutchouc pour réduire l'accumulation des matières dures sur les rouleaux.

Pour tenir compte du guidage de la bande, tant les rouleaux porteurs que les rouleaux de retour ils doivent être réglables dans le sens de course de la bande





+ Chargement de produits en vrac :

Il est recommandé de faire le chargement dans le sens de la course et à une vitesse égale à celle de la bande (1,5 m/s). La matière transportée doit se situer autour du milieu de la bande étant donné qu'un emplacement asymétrique occasionne souvent un dépôt de la bande. La hauteur de chute de la matière doit être la moins élevée possible pour diminuer les effets d'impact sur la bande.

+ Système de tension :

Celui-ci a pour fonction de donner une précontrainte à bande devant assurer :

L'entraînement de la bande par le tambour moteur dans toutes les conditions d'utilisation.

La réduction de la flexion de bande entre les rouleaux porteurs et les rouleaux de retour.

D'après leur mode de fonctionnement, les systèmes de tension se divisent en deux groupes principaux. Système de tension fixe et système de tension auto-réglant.

○ Système d'auto-réglant :

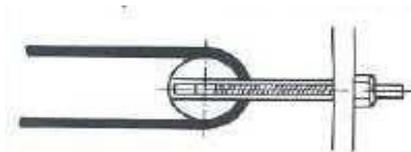
Ce système maintient la précontrainte constante tous en assurant que la tension admissible de la bande n'est pas dépassée.

La forme la plus couramment employée est celle d'un contre-poids. Le meilleur effet est normalement obtenu en plaçant le contre poids à proximité du tambour moteur.



○ Système de tension fixe:

La tension à vis est souvent employée pour les transporteurs de courte longueur à charge modérée.



La tension de vis n'est pas capable d'absorber tous les allongements momentanés qui peuvent se produire en cas de variations de charges subites et pendant la phase d'accélération. Aussi les installations ayant une distance entre axes supérieure à 50m doivent elles être munies d'un pendeur



auto-réglant. Pour notre cas, on a un entre axes de 12m ce qui explique le choix d'un système de tension fixe.

Ce système exige une surveillance constante et un réglage fréquent principalement lors de la mise en service d'une nouvelle bande.

3.3) Elévateur a godets :

Du fait de leurs hautes performances, les élévateurs à godets sur bande sont utilisés essentiellement dans des applications en marche continue à maintenance réduite pour la manutention de la farine crue, du ciment, du charbon pulvérisé ou autres vracs fins (< mm) à des températures pouvant atteindre 130°C. La hauteur va de 10 à 150 m et le débit jusqu'à 1500 t/h. Le pas rapproché des godets et la vitesse de l'élévateur (- 2,1 m/s) garantissent un transport continu de la matière avec un minimum de fuites.

+ Principe:

L'élévateur à godets (fig. 11) se compose d'une bande formant courroie tendue verticalement entre une poulie de tête-motrice et une poulie de pied dont l'axe est déplaçable en hauteur pour permettre le réglage de la tension. Des godets sont fixés sur la bande et l'ensemble est enfermé dans un bâti en bois ou en tôle, équipé d'une goulotte d'alimentation dans le pied de l'élévateur où les godets se remplissent par pelletage et d'une tête de forme appropriée pour évacuer le ciment par projection centrifuge.

La vitesse de la bande dans les élévateurs classiques est de 1-2 m/s, donc relativement lente et adaptée à un travail continu.

+ Description technique de l'élévateur à godets :

- Bâti :

Autrefois en bois, difficile à nettoyer et à désinsectiser, le bâti est maintenant très généralement en métal sous forme d'éléments en caisson de 2 à 3m de longueur raccordés par brides boulonnées.

Les éléments doivent être montés selon un vertical rigoureux sinon la sangle et les godets frottent et usent rapidement le bâti.



- **Tête élévateur :**

La tête a une forme étudiée pour permettre la projection centrifuge des produits. Elle est donc spécifique à une vitesse de bande et un type de produit.

Intérieurement, elle peut être doublée par revêtement d'usure aisément démontable (plaque en acier manganosiliceux, fonte alliée ou caoutchouc)

Un dispositif anti retour est nécessaire surtout sur les élévateurs rapides ou de grande hauteur afin d'éviter le retour en arrière de la bande, en cas d'arrêt accidentel en charge à la tête des élévateurs, est souvent placée une tête de distribution à directions multiples.

- **Pied élévateur:**

Le pied doit être doté d'une trappe de vidange facile d'accès pour permettre le débouillage. Dans les grandes installations, le pied de l'élévateur est dans une fosse qu'il faut prévoir suffisamment vaste pour que les ouvriers puissent y travailler et dotée d'une échelle d'accès.

- **Poulies:**

Les poulies sont pleines ou ajourées. La poulie supérieure comporte des cannelures pour le passage des têtes de boulon des godets. En cas de surcharge, la bande peut patiner sur la poulie supérieure. Ce patinage provoque son usure et peut à la limite causer un incendie. Pour cette raison, les poulies de tête ont un revêtement à fort coefficient de friction avec la bande, En l'absence de patinage, la surcharge est transmise au moteur sur lequel est prévue une sécurité électrique qui l'arrête L'axe de la poulie inférieure se déplace verticalement pour régler la tension de la bande. Sur les petits élévateurs, le réglage se fait par Vis sur les gros, il peut être à contre poids ou par tension hydraulique automatique. Le réglage de la tension modifie la position des godets par rapport au bâti dans le pied d'élévateur, ce qui peut perturber le chargement des godets et augmenter la casse.

- **Bonde:**

Les bandes modernes ont une armature interne en acier ou en fibres synthétiques (polyester), matériaux qui sont moins sensibles aux variations d'hygrométrie que les armatures en coton employées autrefois.

- **Godets:**

Il existe toute une gamme de godets en matériaux et de formes différentes, adaptés à chaque produit.

- Godets classiques en fer blanc ou en acier galvanisé.
- Godets plastique - relativement souples et blessant peu les produits.
- Godets inox (chers) (usages spéciaux).



- Godets caoutchouc (chers) (usages spéciaux).

Les godets sont fixés sur la bande par des boulons à tête plate (côté bande).

✚ Gousset d'alimentation :

Le gousset est en général placé sur le brin descendant, le godet piochant dans le pied de l'élévateur pour obtenir un remplissage maximum. Avec les produits de faible densité (farine), l'alimentation brin descendant est également recommandée.

Pour les produits fragiles, on alimentera de préférence sur le brin montant.

- Dépoussiérage:

La position de la prise de dépoussiérage par aspiration est à définir dans chaque cas. Il est judicieux de la placer sur la boîte de jetée qui fait suite à la tête.

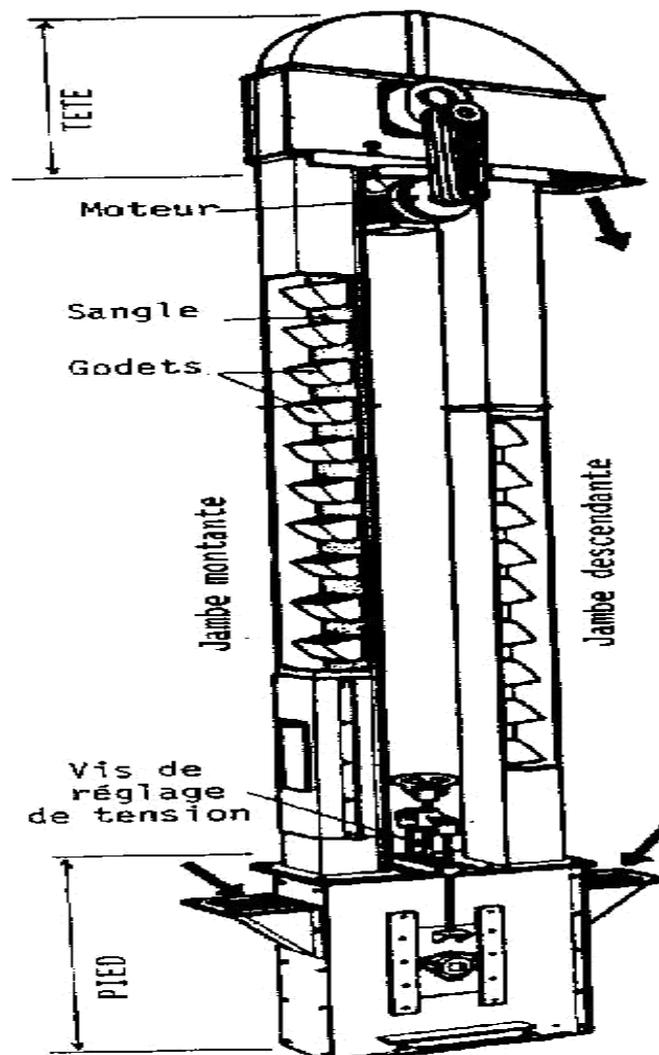


Figure 11: .Elévateur à godets.



Partie III:

ETUDE DE SUJET



I) Présentation du sujet :

1) Introduction :

La pollution de l'air par les poussières est un sujet d'actualité de par son impact sur les écosystèmes et de par son effet négatif sur les différents mécanismes et machines industrielles.

La préoccupation constante au sujet des poussières se traduit au niveau international par la signature de nombreux textes qui définissent en particulier des seuils de plus en plus exigeants en matière de rejet dans l'atmosphère.

Ainsi les techniques de dépolluissage ont évolué ces dernières années en fonction notamment de leurs conditions d'utilisation, de la prise en compte des métaux lourds, des POPs et de l'adaptation spécifique à certains secteurs industriels.

Dans la même optique, notre sujet de stage vient étudier ce souci international à travers le cas du dysfonctionnement du filtre à manche situé en dessus de la salle de compression de broyeur ciment BK5 au sein de l'usine de LafargeHolcim Meknès.

2) Problématique :

Lorsque la transmission de la matière première du transporteur d'alimentation vers l'élévateur à godets et la matière qui a une mauvaise qualité par le transporteur des rejets. Le filtre à manche responsable du dépolluissage ne fonctionne pas correctement. Ainsi pour assurer l'air nécessaire, les équipes de maintenance de LafargeHolcim ont faites des études pour trouver une solution provisoire. Par conséquent, l'air extérieur est poussiéreux ce qui conduira à l'usure précoce des filtres.

Notre mission donc est de déceler l'origine de ces défaillances, et de proposer des solutions techniques et économiques pour notre cas.

II) Détection de l'origine des défaillances :

Le mal fonctionnement du filtre à manche est dû à l'insuffisance du débit de refoulement qui peut être causé par :

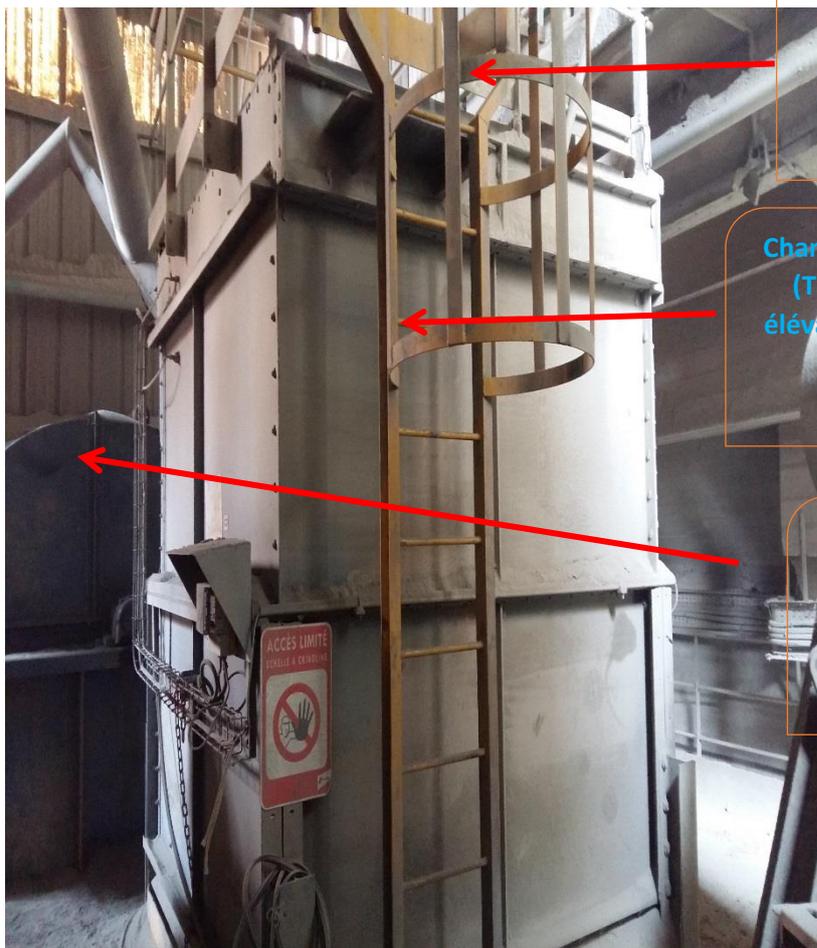
- Filtre sous dimensionné .
- Mauvais choix des manches.
- Surface filtrante insuffisante: nombre ou dimensions de manches insuffisants.



- Ventilateur sous dimensionné.
- Usure des manches.
- Mauvais entretien.
- Défaillance des organes de décolmatage.
- Mal positionnement des gaines.

1 Etude du filtre :

On a fait une première visite du filtre, dans le but de cerner la problématique de notre sujet en l'examinant de près et aussi afin de déceler les anomalies probables au niveau des différents composants : les manches, le système de décolmatage ...



Chambre propre filtre
dépoussiérage (Transporteur
d'alimentation, élévateur entré et
transporteur de rejet)

Chambre salle filtre dépoussiérage
(Transporteur d'alimentation,
élévateur entré et transporteur de
rejet)

Séquenceur de frappe du filtre
dépoussiérage (Transporteur
d'alimentation, élévateur entré et
transporteur de rejet)

Pour faciliter l'étude, on s'est basé sur une fiche technique contenant les différentes caractéristiques de notre filtre :



Marque	INTENSIV
Type	IFIC 55/263 KS
Débit effectif	20000 m ³ /h
Surface filtrante	187 m ²

Nous avons aussi relevé des informations concernant les manches:

Dimensions	Φ 160×3375
Qualité	PEV 610
Nombre	110

Remarque :

- Le filtre semble être en bon état et fonctionne normalement : des rejets en poussières inférieurs à 1mg/Nm³.
- Absence de poussière crachée par la cheminée.
- Les manches sont de bonne qualité et loin d'être usées.
- Fréquence de secouage bien adaptée.

Calcul de vitesse de filtration :

La vitesse filtrante d'un filtre à manche se détermine par le ratio débit/ surface, elle est le plus souvent exprimée en m/mn et doit être comprise entre 0.5 et 1.1 m/mn.

• **Détermination du débit réel parcourant le filtre :**

Le débit d'air sortant du filtre doit être supérieur à la somme du débit d'aspiration de différents composants de notre système pour assurer leur alimentation et garder la chambre sous pression.

Débit d'aspiration de la tête élévateur:

$$34.46 \text{ m}^3/\text{min} \longrightarrow 2067.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

Débit d'aspiration du filtre du deux convoyeurs: 6192 m³/h



Le débit d'aspiration total des 2 compresseurs est :

$$D=8259.6 \text{ m}^3 / \text{h}$$

On prend un débit supérieur à $8259.6 \text{ m}^3 / \text{h}$ pour garder la salle sous pression. Soit un débit de :

$$D'=9000 \text{ m}^3 / \text{h}$$

- **Surface filtrante :**

Surface filtrante : $S = \pi \times R^2 \times h \times n$ tel que :

R= rayon d'une manche

h=hauteur d'une manche

n=Nombre total de manches

On dispose de 110 manches de Φ 160 mm et de hauteur de 3375 mm.

$$\longrightarrow S = \pi \times 0.08 \times 3.375 \times 110$$

$$S = 187 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Donc la vitesse filtrante V:

$$V = \frac{D'}{S} = \frac{9000}{60 \times 187}$$

$$V = 0.8 \text{ m/mn}$$

On a trouvé une vitesse filtrante $V \leq 1.1$

\longrightarrow **Le filtre de la salle de compression est conforme à la norme.**



Conclusion :

Après notre visite du filtre et le calcul qu'on a effectué : on a pu vérifier sa conformité aux normes et par suite on déduit qu'il est bien dimensionné.

Donc l'origine des défaillances est loin d'être propre au filtre ce qui va diriger notre étude vers le ventilateur.

2. Etude du ventilateur :

Puisque le filtre est bien dimensionné, le faible débit produit par ce dernier ne pourrait être que résultat d'un ventilateur sous dimensionné.

Avant de commencer notre étude, on a cherché une documentation concernant le ventilateur en question dans l'archive de l'usine pour avoir une base de départ.

Malheureusement, on n'a pas trouvé. Parce que ce ventilateur a été récupéré d'un autre atelier et par suite nous étions obligées de revenir sur place pour chercher la plaque signalétique de cette machine



Figure 12 : ventilateur du filtre

On a bien cherché, mais il n'y avait point d'informations concernant ce ventilateur même pas une plaque signalétique du produit ce qui a rendu notre mission plus délicate. On a eu recours aux responsables des procédés pour la mesure du débit de refoulement du ventilateur.

Pour cela, on a réalisé un piquage sur le canal de sortie du ventilateur :



Figure 13 : Réalisation du piquage a la sortie de ventilateur

Calcul du débit de refoulement du ventilateur :

Pour calculer le débit, il faudrait tout d'abord mesurer la vitesse de refoulement du ventilateur à l'aide d'un « tube de Pitot ».



Figure 14 :Tube de Pitot

Tube de Pitot

Le tube de Pitot est un dispositif de mesure des vitesses d'écoulement des fluides. Il est représenté schématiquement sur la figure suivante :

PRINCIPE DU TUBE PITOT

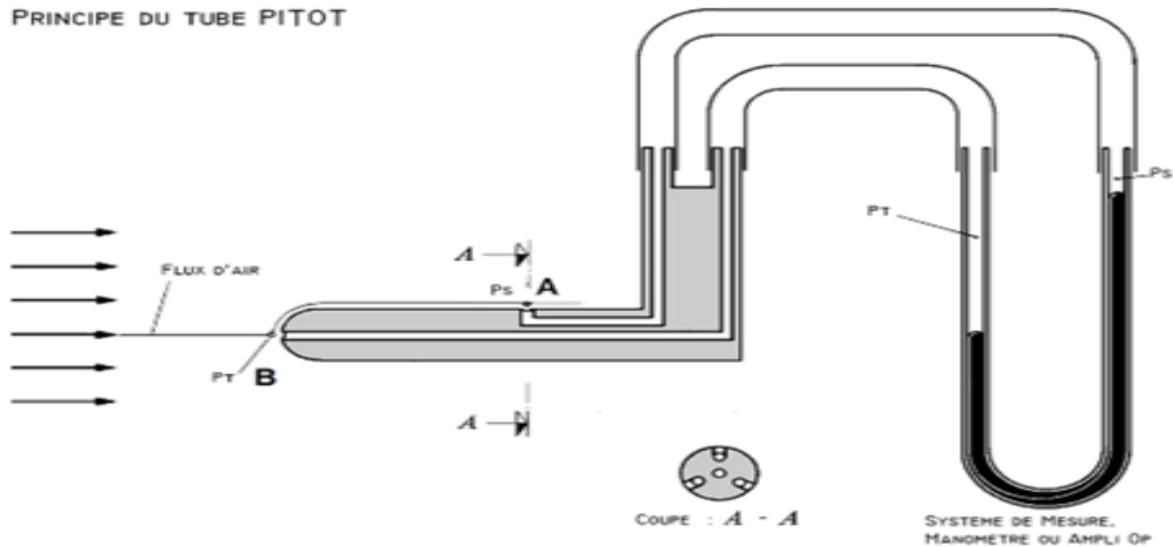


Figure 15 : Schéma d'un tube de Pitot

Il se compose d'un tube de section circulaire dont l'extrémité est profilée. Deux trous sont percés dans le tube pour mesurer la pression, d'une part sur le nez du tube (Une prise de pression totale) et, d'autre part, sur le corps cylindrique du tube (une prise de pression statique). Les deux prises de pression sont reliées à un manomètre différentiel.

Nous supposons que l'écoulement loin du tube est uniforme avec une vitesse V et que l'axe du tube est parallèle à V . Le point B est un point de stagnation, la vitesse du fluide y est nulle.

Appliquons la loi de Bernoulli entre le point A, situé sur la périphérie du tube, où la vitesse est égale à V et le point B où la vitesse est nulle :

La formule générale de Bernoulli :

$$\frac{V_B^2 - V_A^2}{2} + \frac{P_B - P_A}{\rho} + g(Z_B - Z_A) = 0$$

Avec $Z_B - Z_A \sim 0$

Et la vitesse au point B est nul

$$P_A + \frac{\rho V^2}{2} = P_B$$



$$V = (2(P_b - P_a) \div \rho)^{1/2}$$

Mesures effectuées :

Pression statique : +1.1 mmCE avec (1 mmCE = 9.807 Pa)

Section 400×400 mm²

- Pression dynamique en (mmH₂O) : 0.9, 0.6, 1.4, 1.6, 1.2.

→ Pression dynamique moyenne : 1.14 (mm H₂O)

- Température : 49 °C

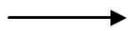
- Humidité relative : 70 % Hr

D'après le catalogue qui se trouve aux annexes la masse volumique de l'air : $\rho = 1.062 \text{ kg/m}^3$

• **Application Numérique :**

On a $V = ((2 \times P_d) \div \rho)^{1/2}$

$$V = ((2 \times 1.14 \times 9.807) \div 1.062)^{1/2}$$



$$V = 4.6 \text{ m/s}$$

Donc le débit D de refoulement du ventilateur est :

$$D = V \times S = 4.6 \times 0.16 = 0.736 \text{ m}^3/\text{s} = 0.736 \times 3600 \text{ (m}^3/\text{h)}$$

$$D = 2650 \text{ m}^3/\text{h}$$



Conclusion :

Le débit d'aspiration des deux convoyeurs est $8259.6 \text{ m}^3/\text{h}$ tandis que le débit de refoulement du ventilateur n'est que $2650 \text{ m}^3/\text{h} \lll 8259.6 \text{ m}^3/\text{h}$.

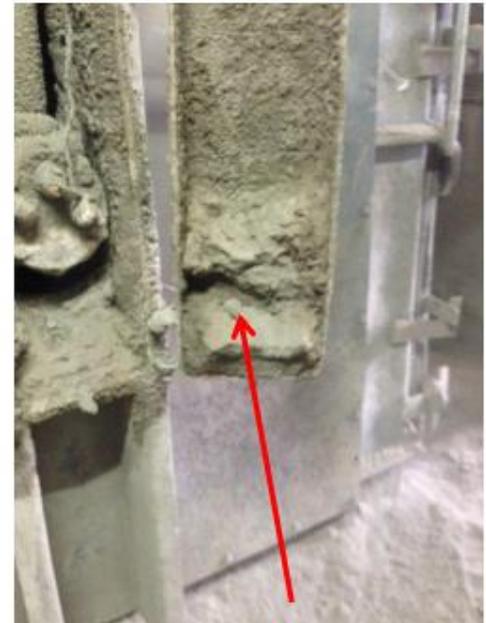
Notre hypothèse était juste, le ventilateur sous dimensionné est la source du dysfonctionnement du filtre à manches.

4. Etude de la gaine :

4.1: Positionnement en tête élévateur :



La figure présente le dépoussiérage de la tête élévateur d'une gaine d'un diamètre de 180 mm, cette gaine est bouchée de temps à l'autre à cause de la matière humide et collante. L'humidité provient de la chaleur clinker mélangé à l'humidité du calcaire et gypse.



On remarque qu'on n'a pas de dépoussiérage en pieds de l'élevateur à godets. Le circuit n'était pas en pression lors de la visite certainement du fait que la matière était humide (pluie).

Le colmatage matière sur la paroi interne de l'élevateur à godet est une conséquence directe du mélange d'une matière à température élevée (clinker chaud) avec des matières humide à température basse (calcaire, gypse, ...).

III) Résolution du problème

Le débit d'aspiration de la salle de compression est $8259.6 \text{ m}^3/\text{h}$, donc on choisit un ventilateur avec un débit de refoulement $9000 \text{ m}^3/\text{h}$ pour assurer l'alimentation des compresseurs en air épuré tout en gardant la chambre sous pression.

Voici est un ventilateur adéquat pour notre situation, de caractéristiques et dimensions suivantes :

Carastéristiques techniques :	
	Référence : CMP-1640-4T-7.5/ATEX
	Vitesse : 1455 tr/min
	Intensité Max 220V : - A
	Intensité Max 400V : - A
	Intensité Max 690V : - A
	Puissance : 5.5 Kw
	Débit : 9000 m ³ /h
	Niveau sonore : 80 dB (A)
	Poids : 92 Kg

Photo non contractuelle.

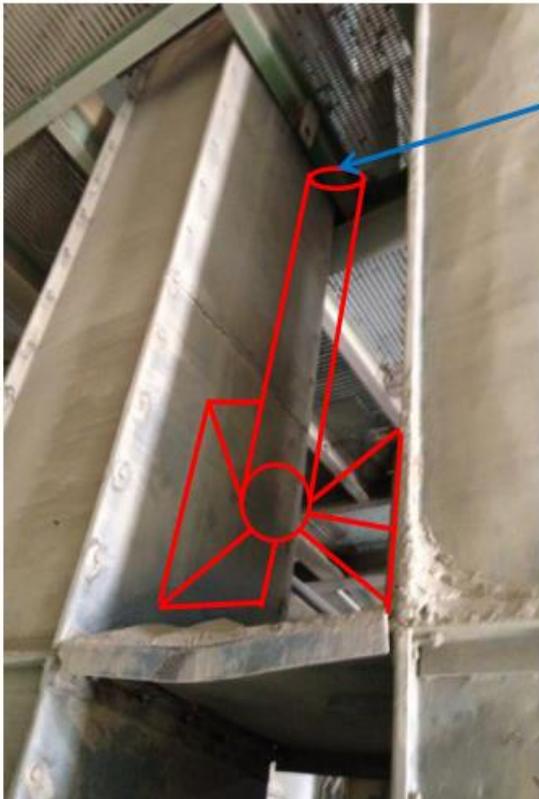
Caractéristiques de Fabrication du ventilateur

2. Action proposé de la gaine :

Modification de la jetée filtre sur bande alimentation broyeur :

- Conduite de retour matière filtre à piquer au niveau du capot de jetée bande vers élévateur à godet avec pénétration de cette conduite de ~15cm à l'intérieur du capot
- Conduite matière diamètre 220mm minimal.





- **Aspiration en pieds de l'élévateur de 1500 m³/h, gaine diamètre 180mm**
- **2 trémies d'aspiration à installer chacune sur le casing de l'élévateur à 2m de la partie de jonction du casing élévateur. Les dimensions de la trémie à relever du tableau des trémies d'aspiration.**

Comme déjà annoncé, le colmatage matière Le colmatage matière sur la paroi interne de l'élévateur à godet est une conséquence directe du mélange d'une matière à température élevée (clinker chaud) avec des matières humide à température basse (calcaire, gypse, ...).

- ❖ Deux solutions sont préconisées :
- ❖ Solution radicale : Séparation de l'alimentation broyeur en clinker par rapport aux autres matières. Solution couteuse et qui nécessite de l'espace.
- ❖ Chauffer les parois internes de l'élévateur aux endroits où le colmatage pose les plus de problème.



CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre étude du dépoussiérage de la salle de compression BK5 a été très fructueuse.

A partir d'hypothèses, notre diagnostic nous a permis de déceler l'origine des défaillances qui est « le ventilateur sous dimensionné »

On a redimensionné le ventilateur en question, de telle manière que le filtre pourrait fonctionner dans de bonnes conditions et assurer un air épuré pour alimenter le compresseur.

Le changement du ventilateur, ne coutera pas grande chose à l'usine. Puisqu'on a trouvé un autre ventilateur ayant un débit $\geq 9000 \text{ m}^3/\text{h}$ avec les mêmes caractéristiques du ventilateur déjà disponible à l'usine.

Il faudrait avant tout, assurer une bonne étanchéité à la salle. En fermant les trous existants et en mettant des joints dans les portes et les différents endroits ouverts.

Une fois le nouveau ventilateur sera mis en place, on pourra fermer les portes de la salle de compression et ainsi éviter l'usure précoce de compresseur qui coutait trop cher à l'usine.

« les filtres sont la base de toute industrie cimentière ».



BIBLIOGRAPHIE

- Documentation LAFARGE.
- Extrait du manuel « LES BASES DU FROID », chapitre VII.
- Guide technique Systèmes de ventilation
- Sites web :
 - www.recer.fr
 - www.fr.endress.com
 - www.aduhme.org
 - www.abcclim.net
 - www2.ademe.fr
 - www.pmmh.espci.fr
 - www.ipn.epfl.ch
 - www.subaru2.univ-lemans.fr
 - www.thermexcel.com
 - www.airap.fr
 - www.nicotra-gebhardt.com



Annexes

AFARGE CEMENTS		FICHE TECHNIQUE		N°
Usine de Meknès				
Ligne	:	Communs cuisson		
Atelier	:	Communs transp. et mise au stock clinker		
Équipement	:	Filtre de dépoussiérage jetée Four 1 & 2		
Sous équipement	:	Salle compresseurs P. 3 et 5		
Emplacement	:	MKS - 309 - FD 20		
CARACTERISTIQUES				Références
Marque	:	INTENSIV		Cde: 93.59/93
Type	:	IFTC 55 / 2-3 KS		
N° série	:			
N° fabrication	:			
Débit effectif	:	20 000 m ³ /h (à air comp. = 22 Nm ³ /h)		
Température	:	100 à 150°C		
ΔP	:			
Cycle de nettoyage	:	Durée d'impulsion:		
Temps d'intervalle	:	Pression: 6 bars		
Surface filtrante	:	1.07 m ² Poids: 2664 kg		
Teneur de l'air purifié	:			
Quantité d'air poussiéreux	:			
<u>Manches:</u>				
Dimensions	:	φ 160 x 3375		
Qualité	:	PEV 610		
Nbre	:	110		

Normes ATEX - Ventilateur centrifuge



Photo non contractuelle.

CMP-1640-4T-7.5/ATEX

Vitesse :	1455 tr/min
Intensité Max 220V : - A	
Intensité Max 400V : - A	
Puissance :	5.5 KW
Débit :	9000 m³/h
Niveau sonore :	80 dB (A)
Poids :	92 Kg

Caractéristiques de Fabrication :

Ventilateur :

- Gaine en tôle d'acier.
- Turbine avec pales vers l'avant en tôle d'acier galvanisé.
- Cerceau d'aspiration anti-étincelles en cuivre ou aluminium.

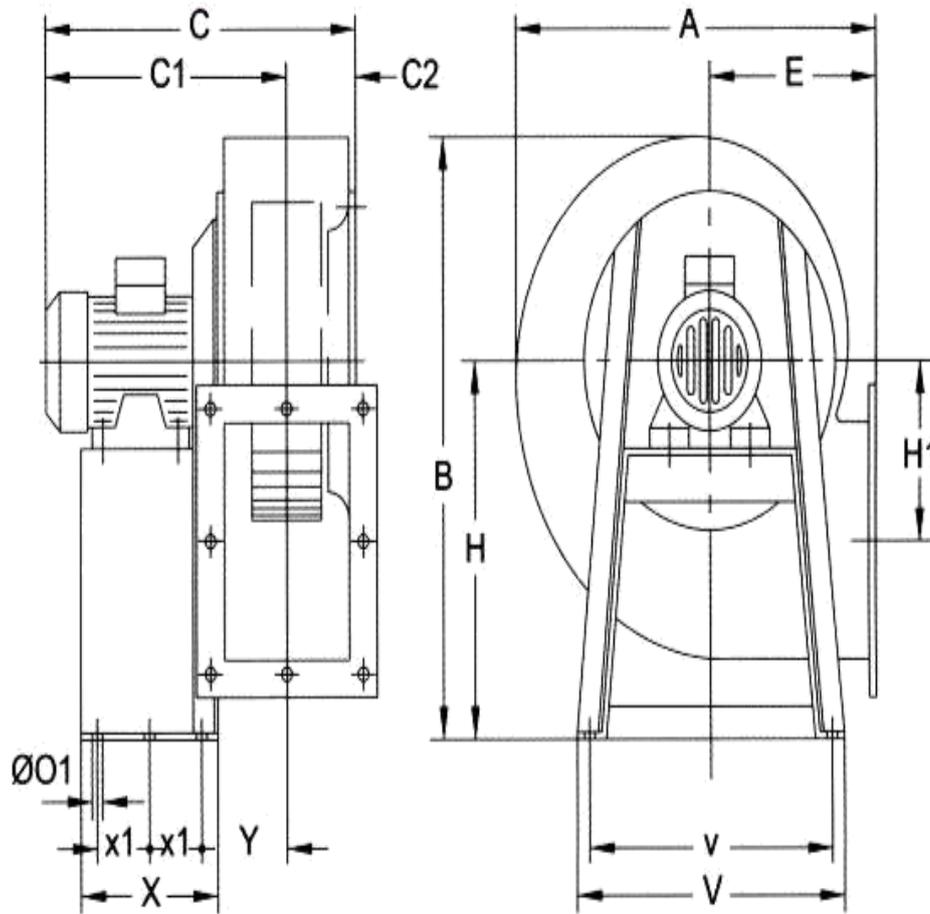
Moteur :

- Moteur classe F, avec roulements à billes, protection IP55 avec homologation ATEX, anti explosions EEx"e" ou antidéflagrants EEx"d".
- Triphasé 230/400 V, 50 Hz (jusqu'à 5.5 CV) et 400/690 V, 50 Hz (puissances supérieures à 5.5 CV).
- Température maximum de l'air à transporter : -20°C à + 80°C.

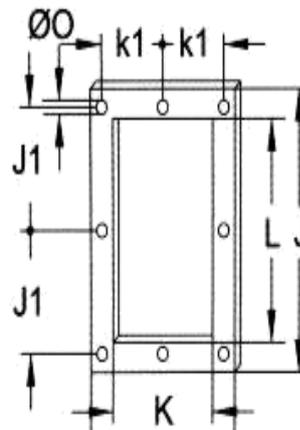
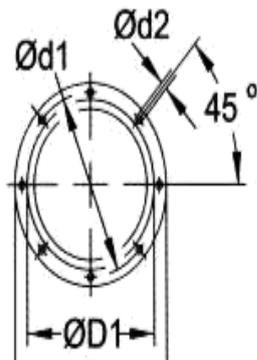
Sur demande :

- Bobinages spéciaux pour différentes tensions et fréquences.
- Construction ATEX pour différentes catégories.

Active
Accédé



Bouche d'aspiration



Activ
Accéde



Ts	100% Hr	90% Hr	80% Hr	70% Hr	60% Hr	50% Hr	40% Hr	30% Hr	20% Hr	10% Hr	1% Hr
38 °C	1,106	1,109	1,112	1,115	1,118	1,120	1,123	1,126	1,129	1,132	1,134
39 °C	1,101	1,104	1,107	1,110	1,113	1,116	1,119	1,122	1,125	1,128	1,131
40 °C	1,096	1,099	1,102	1,105	1,109	1,112	1,115	1,118	1,121	1,124	1,127
41 °C	1,091	1,094	1,098	1,101	1,104	1,107	1,111	1,114	1,117	1,120	1,124
42 °C	1,086	1,089	1,093	1,096	1,099	1,103	1,106	1,110	1,113	1,117	1,120
43 °C	1,081	1,084	1,088	1,091	1,095	1,099	1,102	1,106	1,109	1,113	1,116
44 °C	1,075	1,079	1,083	1,087	1,090	1,094	1,098	1,102	1,105	1,109	1,113
45 °C	1,070	1,074	1,078	1,082	1,086	1,090	1,094	1,098	1,102	1,106	1,109
46 °C	1,064	1,069	1,073	1,077	1,081	1,085	1,089	1,094	1,098	1,102	1,106
47 °C	1,059	1,063	1,068	1,072	1,076	1,081	1,085	1,089	1,094	1,098	1,103
48 °C	1,053	1,058	1,063	1,067	1,072	1,076	1,081	1,085	1,090	1,095	1,099
49 °C	1,048	1,053	1,057	1,062	1,067	1,072	1,077	1,081	1,086	1,091	1,096
50 °C	1,042	1,047	1,052	1,057	1,062	1,067	1,072	1,077	1,082	1,087	1,092
51 °C	1,036	1,042	1,047	1,052	1,057	1,063	1,068	1,073	1,078	1,084	1,089
52 °C	1,030	1,036	1,041	1,047	1,053	1,058	1,064	1,069	1,075	1,080	1,086
53 °C	1,025	1,030	1,036	1,042	1,048	1,053	1,059	1,065	1,071	1,076	1,082