



MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDE

Pour l'Obtention du

**Diplôme de Master Sciences et Techniques
Spécialité : Ingénierie Mécanique**

Sous le titre

Etude de la maintenance des installations de dépoussiérage de Lafarge-ciments, usine de Meknès.

Présenté par :

Med Nawfal ELMAGUIRI

Encadré par:

- Ahmed EL BIYAALI, Professeur du département Génie Mécanique, FST-Fès
- Redouan KRAMCHI, Responsable Maintenance, LAFARGE-Meknès

Soutenu le 22 juin 2010

Le jury :

- Mr. SEDDOUKI
- Mr. TOUCHE
- Mr. BIYAALI

Année Universitaire : 2009 /2010

Stage effectué à : LAFARGE Meknès



Mémoire de fin d'études pour l'obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Nom et prénom: **Med Nawfal ELMAGUIRI**

Année Universitaire : **2009/2010**

Titre: **Etude de la maintenance des installations de dépoussiérage de Lafarge-ciments, usine de Meknès.**

Résumé

Le dépoussiérage est une étape nécessaire du processus de fabrication du ciment du groupe Lafarge et particulièrement Lafarge-ciment usine de Meknès. En effet, la direction de l'usine s'est engagée dans une politique de qualité environnementale visant réduire voire éliminer les émissions de poussières qui peuvent engendrer un environnement sale ou parfois entraîner carrément l'arrêt de la production.

Le présent Projet Industriel de Fin d'Etude entre dans le cadre du développement du système la maintenance des installations de dépoussiérage. Pour ce, on a fait une Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) d'un filtre qui tombait souvent en panne entraînant l'arrêt de la ligne 2.

Nous avons également conçu un logiciel informatique nous permettant le marquage et le suivi de toutes les pannes que subissent les filtres de dépoussiérage.

Finalement on a réalisé une analyse technico-économique du système de maintenance actuel qui a abouti par la réduction d'un nouveau cahier de charges que l'on a introduit dans un appel d'offre aux entreprises spécialisées dans la maintenance industrielle de ce genre d'équipements.

Mots clés:

Maintenance, Dépoussiérage, Filtre hybride, AMDEC, Ishikawa, Analyse technico-économique, Sous-traitance, GMAO.

Dédicace :

*A vous, qui êtes toujours là pour m'aider,
Ce travail est pour vous remercier,
D'avoir me conseiller et m'encourager,
Chaque jour pour avancer.*

A mes très chers parents

A ma très chère femme L.Maryem

A mes frères Marouane, Abdelkarim, Taha, Abdihakim, Omar , Monsif.

A tout mes amis Rachid ELALAJI,

Monsif ELMENSSOURI,

Noureddine BOUTAMMACHET,

Et enfin à tout qui ont contribué de prêt ou de loin à la réalisation de ce travail

Remerciement

Au terme de ce travail, c'est un devoir agréable d'exprimer en quelques lignes la reconnaissance que je dois à ceux dont j'ai sollicité l'aide et la collaboration.

Je tiens à exprimer mon reconnaissance à M. ELKHALFI, Chef de département Génie Mécanique qui m'a encouragé tout au long de la période de mon stage.

Ma gratitude s'adresse tout spécialement à M. KRAMCHI, parrain industriel du projet, et Responsable Maintenance de LAFARGE-Meknès qui a toujours pris le temps de m'écouter, de me suivre et de me conseiller dans les moments importants de ce travail.

Mes remerciements les plus sincères à M. BIYAJALI, mon encadrant du projet et enseignant au Département Mécanique de la FST-Fès, pour son aide, son conseils fructueux et qui n'a cessé de me prodiguer tout au long de mon travail.

Nous adressons nos plus sincères remerciements à M. SEDDOUKI enseignant au sein du Département Mécanique et à M. TOUACHE d'avoir l'honorée en tant que membre du jury.

Ma reconnaissance va également au personnel de LAFARGE, qui m'a toujours considéré comme faisant partie de leur équipe durant la période de mon stage.

J'adresse ma profonde gratitude au corps professoral de la FST et plus particulièrement à tous les professeurs du département Génie Mécanique.

Enfin, vouloir remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, sans oublier personne.

Résumé

Le dépoussiérage est une étape nécessaire du processus de fabrication du ciment du groupe Lafarge et particulièrement Lafarge-ciment usine de Meknès. En effet, la direction de l'usine s'est engagée dans une politique de qualité environnementale visant réduire voire éliminer les émissions de poussières qui peuvent engendrer un environnement sale ou parfois entrainer carrément l'arrêt de la production.

Le présent Projet Industriel de Fin d'Etude entre dans le cadre du développement du système de la maintenance des installations de dépoussiérage. Pour cela, nous avons fait une Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) d'un filtre qui tombait souvent en panne entraînant l'arrêt de la ligne 2.

Nous avons également conçu un logiciel informatique nous permettant le marquage et le suivi de toutes les pannes que subissent les filtres de dépoussiérage.

Finalement nous avons réalisé une analyse technico-économique du système de maintenance actuel qui a abouti par la rédaction d'un nouveau cahier de charges que l'on a introduit dans un appel d'offre aux entreprises spécialisées dans la maintenance industrielle de ce genre d'équipements.

Abstract

Considering the de-dusting as one of the main pillar of Lafarge group and especially of Lafarge-cements factory of Meknes, the top management of the factory has been engaged in an environmental policy which targets the reduction or better the elimination of all the dust emissions which can engender a dirty environment and even sometime stop the production.

This end of studies project is a part of the de-dusting facilities maintenance developement process. So to execute this project, we've done a Failure Modes, Effects and Criticality Analysis (FMECA) to a filter which has a lot of troubles and which causes the arrest of line 2.

We have also designed a software which help us to mark and to follow all the troubles that happen to our de-dusting filters.

Finally, we've analysed the technical and economic aspect of the actuel maintenance system which help us to write a new specification that we will submit to our future subcontractors of the maintenance of this kind of machines.

Sommaire

Chapitre I :

1	Présentation de LAFARGE Maroc	1
2	Présentation de Lafarge Meknès.....	2
2.1	Processus de fabrication de ciment [9]	5

Chapitre II:

1	Les filtres à manches	9
1.1	Technologie	10
1.2	Pertes de charges	10
1.3	Vitesse de filtration	12
1.4	Nature de média.....	12
1.5	Nettoyage	13
2	Principaux types de filtres à manches.....	15
3	Electrofiltres	16
3.1	Définitions et concepts.....	16
3.2	Conception et design d'un électrofiltre.....	19

Chapitre III:

1	Filtre hybride	23
1.1	Présentation	23
1.2	Principe.....	23
2	Analyse AMDEC	25
2.1	Définition.....	25
2.2	Types et approches AMDEC	25
2.3	Méthodologie de l'AMDEC machine	26
2.4	Initialisation de l'étude.....	26
2.5	Analyse fonctionnelle	27
2.6	Evaluation de la criticité	30
3	Analyse et diagnostic du filtre hybride	31
3.1	Définition du diagramme d'Ishikawa	31
3.2	Analyse et diagnostic du filtre.....	31
3.2.1	Causes liées au milieu.....	33
3.2.2	Causes liées à la matière	33
3.2.3	Causes liées aux méthodes.....	33
3.2.4	Causes liées aux matériels.....	35

Chapitre IV

1	Application informatique(GEMAFIL)	40
1.1	Collecte des données	41
1.2	Elaboration du MCD	42
1.2.1	Lecture des informations filtres	42
1.2.2	Ajouts de données de maintenance	43
2	Conception des interfaces utilisateur	43
2.1	Accueil	44
2.2	Menu principal	45
2.3	Menu atelier	46
2.4	Menu panne	48
2.5	Menu historique	48

Chapitre V:

1	Définitions	51
1.1	La maintenance	51
1.2	Objectifs de la maintenance	51
1.3	Coûts de la maintenance	51
1.4	Enjeux technico-économiques de l'externalisation de la maintenance	52
2	Chiffrage de la maintenance	53
2.1	Coûts directs	53
2.1.1	Coût de la main d'œuvre	53
2.1.2	Coût des pièces de rechange	56
2.2	Coûts indirects	56
2.2.1	Débit de clinker qui manque à gagner	56
2.2.2	Poussières émises	57
2.2.3	Coûts indirects totaux	57
2.2.4	Coût total de la maintenance	57
3	Cahier de charges pour les sous-traitants de la maintenance	57
3.1	Introduction	57
3.2	Cahier de charges	58
3.2.1	Objet du contrat	58
3.2.2	Appareils concernés	58
3.2.3	Nature des prestations requises	58
3.2.4	Limites des prestations	61

3.2.5	Communication	61
3.2.6	Compte rendu.....	62
3.2.7	Moyens humains, Matériels et logistique	62
3.2.8	Sécurité.....	64
3.2.9	Environnement	64
4	Choix des sous-traitant.....	65
4.1	Analyse des offres	66
4.1.1	Offre A, INTENSIV	66
4.1.2	Offre B, MORTELECQUE.....	67
4.1.3	Offre C, GORE	67
4.1.4	Offre D, GERISCOM.....	67

Liste des Acronymes

BC: Broyage Cru.

BK: Broyage cuit.

AMDEC: Analyse des Modes de défaillance de leurs Effets et de leur Criticité.

IPR : Indice Prioritaire de Risque.

GMAO: gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur.

MAXIMO: logiciel de GMAO de Lafarge groupe.

ESP: Electrostatic precipitator.

Introduction

Dans plusieurs 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 produits ayant une valeur marchande.

Ceci a conduit à une sorte de prise de conscience nouvelle pour l'environnement en tant que progrès pour l'entreprise, ainsi que la maîtrise des pollutions qui s'accorde parfaitement avec le mode d'actions établi par un système de management environnemental. Car depuis quelques années, le management environnemental est devenu le système de management en vogue dans le monde industriel. De ce fait, la norme internationale ISO 14001 est devenue un instrument incontournable de ces démarches qui mobilisent les moyens à la fois humaines, techniques et économiques des dites entreprises.

Etant consciente de cet enjeu, Lafarge-Ciments a entrepris depuis son acquisition de l'usine de Meknès en 1997 une politique environnementale appuyée sur les standards de la norme ISO 14001, et ce en installant des équipements de dépoussiérage de différentes conceptions et technologies afin de limiter autant que faire se peut les poussières émises des différentes installations de l'usine.

Le fonctionnement des installations étant très affectées par les pannes et défaillances à répétition pendant les dernières années, le département maintenance a entrepris un projet intitulé "Projet Maintenance 2010" qui avait pour objectif la refonte des gammes de visites, les méthodes de préparations ainsi que les exécutions des interventions sur l'ensemble des installations de l'usine. Les installations de dépoussiérage étant plus sensibles et plus complexes, la direction du département a décidé de faire une étude plus poussée sur les filtres afin de pouvoir contrôler de façon efficace leurs fonctionnements et maîtriser leurs pannes et défaillances et surtout optimiser leur système de maintenance.

Le présent projet, et qui s'intitule "Etude de la maintenance des installations de dépoussiérage", entre dans le cadre de cette étude. Il se compose de trois parties principales : 1) une étude de cas détaillée d'un filtre; 2) La conception d'un logiciel GMAO spécifique aux filtres; 3) une analyse technico-économique de la sous-traitance des installations de dépoussiérage.

La première partie (chapitre 3) s'intéresse au filtre amont du four 2 qui tombe souvent en panne, entraînant l'arrêt du four, mais dont on n'arrive pas encore à déceler l'origine de la défaillance. On va donc faire une analyse critique de ce filtre, on décortiquera le problème et on essaiera de proposer un plan d'actions visant à éliminer voire éradiquer une fois pour toute le problème.

Dans la seconde partie (chapitre 4), on va essayer de trouver un outil qui permettra d'atteindre chaque filtre, afficher ses caractéristiques, faire le suivi de chaque filtre dans l'usine, ainsi que de pouvoir archiver les dates et heures d'arrêts et les pièces de rechanges utilisées ...etc. chose que le logiciel MAXIMO déjà en place ne le permet pas.

La troisième partie (chapitre 5) étudie la sous-traitance de la maintenance des installations de dépoussiérage. En effet, une expérience pareille d'externalisation de la maintenance a déjà été faite au sein de Lafarge Bouskoura-Casablanca et les résultats ont été satisfaisants. La direction de Lafarge-Ciment usine de Meknès a décidé d'étudier la possibilité de faire pareil, donc la troisième partie présentera une étude qui argumentera, d'un point de vue économique et technique, la faisabilité de la sous-traitance.

1 Présentation de LAFARGE Maroc

Le groupe Lafarge, créé en 1833 en France, est aujourd'hui actif sur tous les continents et a connu une importante dynamique de croissance.

En 1995, Lafarge s'est associé de façon paritaire avec la Société Nationale d'Investissement (SNI) afin de créer Lafarge Maroc.

L'année 1996 a vu se réaliser un projet qui a permis à la société de devenir le pôle fédérateur d'un groupe comportant 4 cimenteries CINOUCA (Casablanca), CADEM (Meknès), CEMENTERIE TANGER (Tanger) et CEMENTOS MARROQUIES (Tétouan).

En novembre 1996 CINOUCA et CADEM fusionnent pour devenir Lafarge Ciments. Et en janvier 2000 Tanger et Tétouan fusionnent pour devenir Lafarge Cementos.

LAFARGE Ciment est le premier cimentier marocain avec une capacité de production qui dépasse les 4.5 millions de tonnes par an et détient plus de 40% de part de marché marocain.

La croissance du marché du ciment dans le Nord du Maroc et la capacité limitée des deux usines de Tétouan et Tanger depuis plusieurs années, ont fait que les responsables de Lafarge Maroc ont décidé la construction d'une nouvelle usine sur un terrain vierge : Usine de Tétouan II.

Lafarge Ciments n'est pas seulement une entreprise économique mais c'est aussi une entité sociale à part entière. Elle compte parmi son effectif plusieurs catégories de travailleurs avec des compétences et des qualifications différentes.

Aussi, elle cherche en permanence à maîtriser sinon à améliorer le niveau de son personnel en lui assurant des séances de formation dans des disciplines variées.

La société porte une attention particulière à la formation en lui consacrant un budget annuel supérieur à 3% de la masse salariale.

Les activités de Lafarge Maroc sont ramenées dans le tableau suivant :

	Activités	Implantation
Lafarge Ciments	Production du ciment : - CPJ 35, CPJ 45, CPA 55. - Super blanc CPJ 45.	4 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. - De carreaux de plâtre standards hydrofuges. - De dalles pour plafond.	Une usine à Safi avec deux fours d'une capacité de 800000t. Une presse à carreaux et un carrousel pour dalles de plafond.
Gravel Maroc	Cette unité de granulats vient en appui au dispositif Béton	située à Khayayta Berrechid
Chaux	Fabrication de - Chaux vive en roche - Chaux vive moulue en vrac - Chaux vive hydratée en vrac	Sur le site de l'ancienne cimenterie de Tétouan.

Tableau I.1 : Activités de Lafarge Maroc

2 Présentation de Lafarge Meknès

Dénommée, initialement, CADEM (Ciments Artificiels de Meknès), l'usine a démarré en 1952 avec une seule ligne de production à voie humide d'une capacité de 400 T/j. Depuis, plusieurs améliorations techniques ont été réalisées pour augmenter le niveau de production (adjonction d'un deuxième four en 1969 avec un nominal de 900 tonnes/jour, installation de broyeurs à cru et à ciment, amélioration de la station de concassage, etc.) ; en 1979, la production du ciment de CADEM a atteint 650.000 tonnes.

Toujours à la recherche de techniques de pointe de nature à améliorer le rendement de ses installations et de leurs exploitation, CADEM a lancé dès 1982 un vaste programme d'économie d'énergie qui se résume comme suit :

- Substitution du combustible solide (charbon et coke de pétrole au fuel dont les coûts

sont devenus prohibitifs) ;

- Conversion de son procédé de fabrication de la voie humide à la voie sèche. Ce projet dont les ateliers ont démarré en janvier 1985 a été réalisé dans des délais et à un coût performant
- 1990 : la capacité de production passe de 1500 à 1800 t/j, grâce à des modifications au niveau du précalcinateur et du refroidisseur.
- 1993 : démarrage de la deuxième ligne de cuisson d'une capacité de 1200 t/j.

Dans le cadre de la privatisation des cimenteries (Tanger, Tétouan et Meknès au profit de LAFARGE Maroc, la CADEM est devenue sa propriété au début de l'an 1996).

Les ventes de l'usine de Meknès représentent 30 % des ventes LAFARGE MAROC, qui sont réparties comme suit : 75 % en CPJ 35 et 25 % en CPJ 45, les deux seules qualités produites par l'usine .Le périmètre d'action de l'usine de Meknès comprend les provinces de : Meknès, Ifrane, Khénifra, Er-Rachidia, Sidi Kacem, Khemisset et la province de Kenitra sans la ville de Kenitra.

N.B : l'usine de Meknès est le seul qui produit le ciment prise mer au Maroc sur commande.

Description des services

- **Service fabrication**

Ce service est chargé de la conduite des installations à fin de produire une matière de qualité, et ceci en 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 Procédé Système**

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 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 des opérations 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 Electrique**

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'effectifs 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 Achat**

Il a pour principale mission la gestion des stocks suivant la politique achats du groupe et le respect des procédures également des marketings achats, l'homologation des fournisseurs commandés et le suivi des livraison.

- **Service Formation**

Le projet formation se charge :

- suivie par les collaborateurs de l'usine du module de formation et de sensibilisation à l'environnement ;
- Traiter l'ensemble des formations et stages pour tous les employés de l'usine.

- **Secteur utilité**

Ce secteur fait partie du département maintenance, il s'occupe entre autres du circuit poussière, circuit d'eau froide, circuit d'eau chaude et du circuit d'air comprimé.

2.1 Processus de fabrication de ciment [9]

Le processus de fabrication du ciment au sein de LAFARGE-Ciments usine de Meknès se réduit en étapes suivantes :

i. 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 80mm, puis acheminée vers l'usine à l'aide des bandes transporteuses.

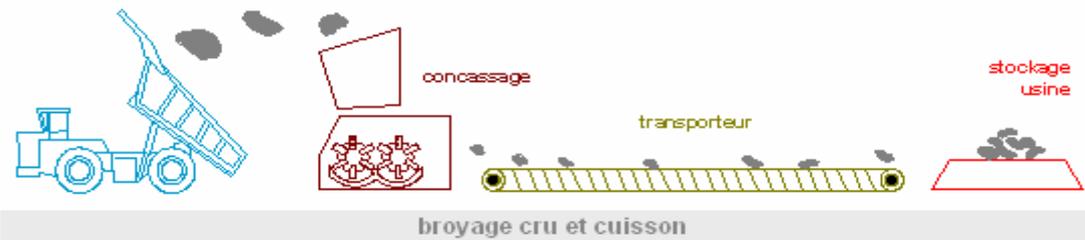
LAFARGE-Ciments usine de Meknès dispose de deux ateliers de concassage équipés de crible à disques

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

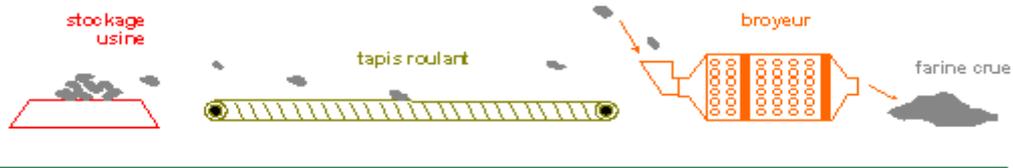
La figure ci-dessous montre les différentes opérations effectuées à la carrière :

LE PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT

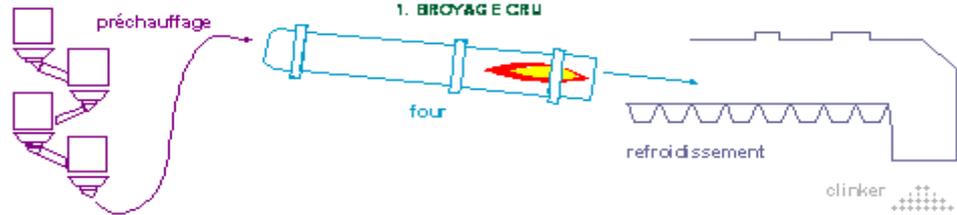
carrière



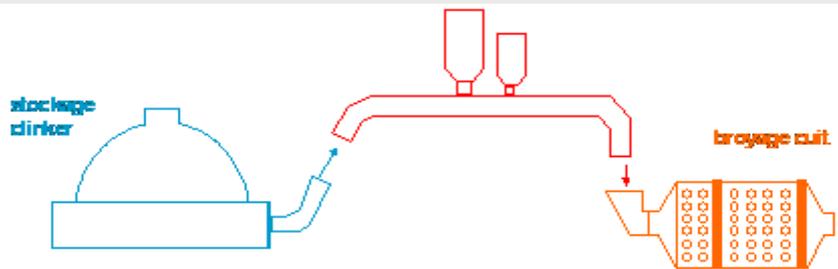
broyage cru et cuisson



1. BROYAGE CRU



broyage, stockage, conditionnement, expédition



1. BROYAGE



ii. Préparation du 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 hérisseur 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.

iii. 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 contre courant 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.

iv. Broyage du 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 I.3 : Liste des machines d'ensachage

Introduction

Le filtrage est une fonction importante dans le processus de fabrication du ciment, Il existe différents types de filtres se basent sur différents principaux par suite, nous allons expliciter le fonctionnement et les caractéristiques des différents types de dépoussiéreurs, à savoir les filtres à médias et les électrofiltres, on va aussi expliquer les différents facteurs qui misent en compte dans l'étude de comportement de chacun d'eux.

1 Les filtres à manches

On désigne sous ce nom des dépoussiéreurs 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 préfiltre, 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. On se reportera au schéma de la figure II 2, page 26 pour la description qui suit.

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[1].

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. Nous reviendrons sur ces différents types de nettoyage au paragraphe 1.5.

Les solides collectés tombent dans une trémie et sont 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 Pertes de charges

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.

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

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

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 [4].

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 de charge redescend à une valeur basse et le cycle reprend.

La figure I 1 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.

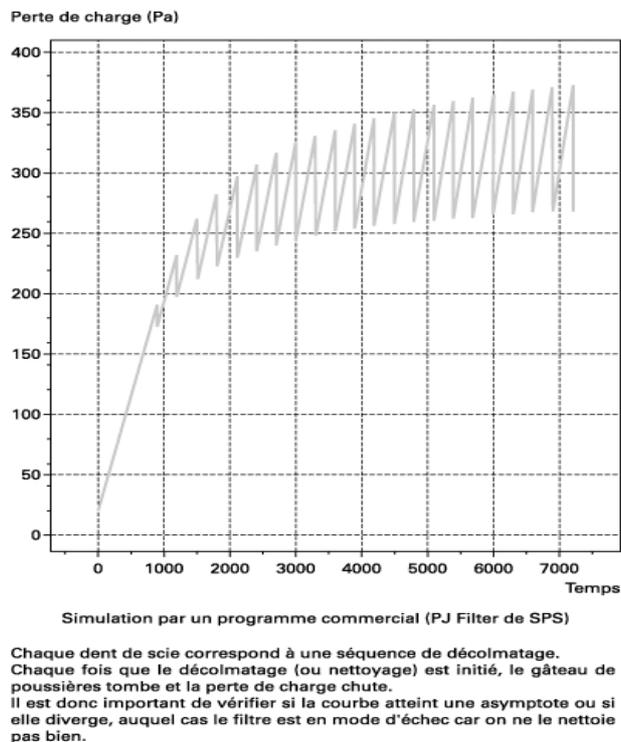


Fig. II.1 : Variation de la perte de charge d'un filtre à manches en fonction du temps

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 de média

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.

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.

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 marchés. 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 I 2 donne un exemple de deux types de médias.

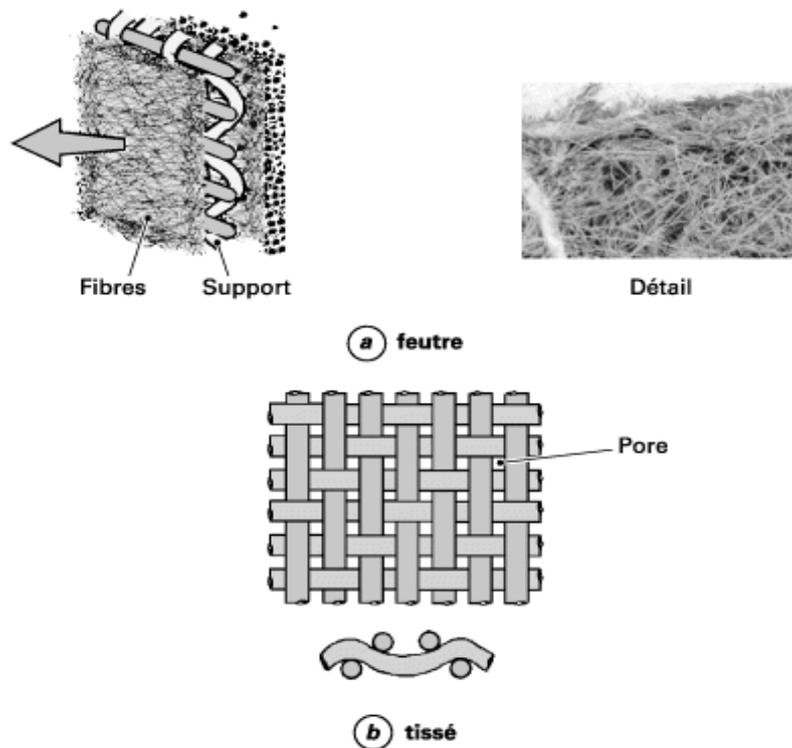


Fig.II.2 - Différents médias de filtration (feutre et tissé)

1.5 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 *off line* 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 II 3, 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 cet air 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.

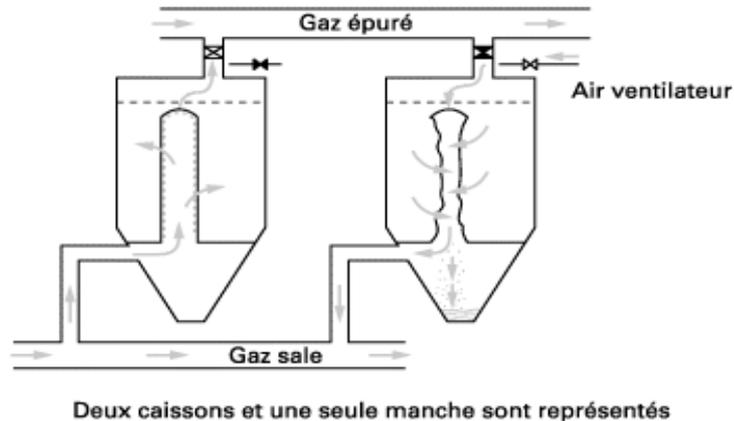


Fig.II.3 - Filtre à contre-soufflage

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 médias tissés s'étant révélés peu adaptés à ce mode de nettoyage. Ils n'ont connu un réel développement 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 Principaux types de filtres à manches

Le type de filtre à utiliser dépend, ainsi qu'il a été indiqué au paragraphe 6.1 de plusieurs facteurs :

- le type de décolmatage (secouage, air inverse ou air pulsé) ;
- le côté des manches où est récoltée la poussière captée (intérieur ou extérieur) ;
- le sens de passage des gaz dans la trémie (bas vers haut, haut vers bas) ;
- l'orientation des manches (verticales ou horizontales).

La tendance aujourd'hui est à l'utilisation de manches verticales plutôt longues (> 5 m), avec un décolmatage par air pulsé, une captation des poussières côté externe et des gaz qui circulent de bas en haut. Toutefois, certains secteurs industriels privilégient d'autres systèmes, en particulier, les filtres à manches horizontales, de par leur encombrement restreint.

Une classification des filtres en fonction de leur efficacité a été définie et s'utilise surtout en filtration à très haute efficacité. Contrairement à la plupart des autres dépoussiéreurs, le résultat est peu dépendant de la granulométrie. L'efficacité est excellente si, lors de la construction, on apporte un soin particulier à l'étanchéité puisqu'une fraction minime de gaz non traité fuyant aurait des conséquences importantes sur le taux final de poussières.

L'instrumentation nécessaire à une bonne conduite des filtres consiste d'abord en un capteur de pression différentielle, un capteur de température qui pourra servir à déclencher un by-pass d'urgence et, éventuellement, un analyseur de CO dans la trémie pour prévenir tout risque d'incendie. Mentionnons que, lors des phases d'arrêt et de démarrage, il est souvent nécessaire de maintenir (ou d'amener) le filtre en température à l'aide de batteries de chauffe pour éviter certains problèmes liés à la condensation.

3 Electrofiltres

3.1 Définitions et concepts

Le principe de fonctionnement d'un électrofiltre (ESP, *electrostatic precipitator*) est fondé sur la force appliquée par un champ électrique sur une particule chargée. Une particule est chargée, souvent naturellement, mais sa charge est trop faible pour pouvoir donner naissance à une force d'attraction suffisante pour être exploitable. En revanche, elle est suffisante pour pouvoir créer des désagréments divers, depuis la simple adhésion à une surface jusqu'à des problèmes de sécurité. Il faut donc que la particule reçoive, par un procédé externe, une charge suffisante.

- **Charge de particules ou de gouttelettes**

La charge est communiquée par ionisation du gaz vecteur, obtenue le plus souvent par un fil porté à un potentiel élevé et donnant « l'effet couronne ». Dans son principe, un fil tendu entre deux plaques ou situé au milieu d'un cylindre est porté à une haute tension négative (rien n'interdit de porter le fil électrode à une tension positive, mais le procédé est moins efficace, aussi emploie-t-on quasi exclusivement les décharges couronnes négatives). À partir d'une certaine tension, un halo lumineux violet apparaît autour du fil. Au sein de ce halo

apparaissent de nombreuses espèces radicalaires ainsi que de l'ozone, ce qui est parfois mis à profit pour éliminer d'autres polluants comme les oxydes d'azote ou les composés organiques volatils. Ce phénomène est stable dans une plage de tension importante, jusqu'à ce que, en augmentant toujours le voltage, des arcs et des étincelles apparaissent entre le fil et sa contre-électrode. On a alors atteint la tension de claquage. Au sein du halo violacé, le gaz est dans un état d'excitation intense et des électrons sont arrachés qui, par effet de collision en cascade, fournissent une avalanche d'ions et de radicaux. C'est par ce phénomène que les particules vont se charger. Un aspect intéressant à ne pas négliger est que la mobilité des particules et des électrons est très différente. Au fur et à mesure que les particules se chargent, autour de l'électrode émissive se crée une charge d'espace qui contribue en quelque sorte à isoler l'électrode par blindage et réduit le passage du courant. On parle en anglais de « *corona quenching* » ; ce phénomène est à éviter. Il apparaît plus particulièrement lorsque les gaz à traiter sont très riches en fines particules. La valeur de la tension de seuil à partir de laquelle l'effet couronne est obtenu dépend de la pression et de la nature du gaz ainsi que de la géométrie. Typiquement, pour un gaz comme l'air à pression ordinaire, on a des tensions d'amorçage de 20 kV environ. Le courant suit ensuite une loi non linéaire en fonction du voltage. Un exemple de courbe intensité-tension est donné figure II 4 ; elle montre l'influence d'une charge d'espace augmentant jusqu'à l'effet de « *corona quenching* ».

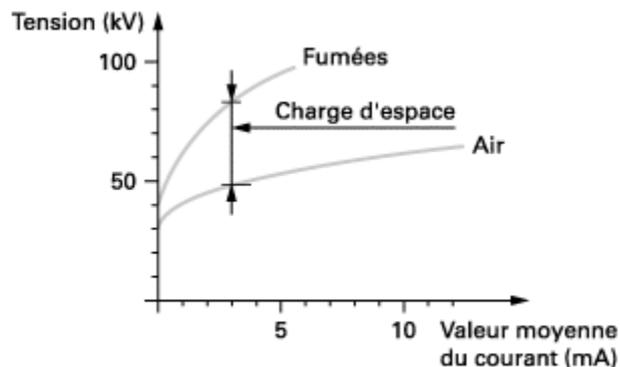


Fig.II.4 : Chargement de particules ou de gouttelettes

Ainsi qu'il a été dit, les particules se chargent par choc quand elles rencontrent des électrons ou d'autres particules chargées ou bien par diffusion, liée à l'agitation thermique des ions. Le second mécanisme n'est important que pour les toutes petites particules submicroniques. En pratique, la charge est atteinte en quelques dixièmes de seconde. Il est à noter qu'il existe, pour une particule de taille donnée, une charge maximale qui ne sera jamais dépassée. $E_{\text{émission}}$ vaut environ 10^9 V/m en émission d'électrons et 2×10^{10} V/m en émission

de charges positives, $E_{\text{émission}}$ étant la valeur du champ électrique (en V/m) où se produit l'effet.

Pour les particules liquides, un mécanisme différent va limiter le phénomène : au-delà d'une certaine charge, dite charge de Rayleigh, la goutte va tout simplement exploser.

On a alors :

$$Q_{\text{max}} = d^{1.5} \sqrt{2\pi\sigma}$$

avec σ tension superficielle.

▪ **Déplacement des particules dans le champ électrique**

La particule est soumise à une force :

$$F = Q E$$

avec :

- » E : champ électrique en (V/m)
- » Q : charge (en C), égale au nombre de charges élémentaires multiplié par la charge d'un électron.

La vitesse de migration sera, comme dans le cas de la gravitation, calculée en équilibrant la force découlant de la loi de Stokes à cette force électrique :

$$v = \frac{QEC}{3\pi\mu d}$$

Avec C coefficient de traînée.

Les électrofiltres pouvant capturer des particules submicroniques, le coefficient de traînée sera calculé en appliquant la correction de Cunningham. Le mécanisme global est décrit par le schéma de la figure II 5.

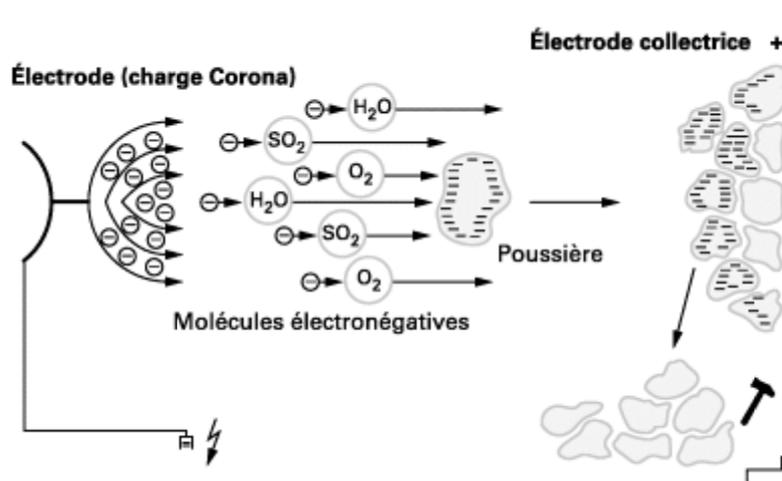


Fig.II.5- Mécanisme de charge et de déplacement des particules dans le champ électrique

Pendant qu'elles sont attirées vers la contre-électrode, les particules sont aussi poussées par le gaz, ce qui fait que l'électrofiltre ne dispose que d'un temps limité pour exercer son action. Si l'on suppose que les particules collectées à la paroi ne peuvent pas être entraînées, on aboutit à la relation de Deutsch :

$$\eta = \exp [- wA/G]$$

Avec :

- w : vitesse de migration
- A : surface offerte par les contre-électrodes
- G : débit gazeux.

Il faut bien insister sur le caractère tout théorique de cette loi, qui est de peu d'utilité dans l'absolu. Néanmoins elle est précieuse, car une fois w déterminé empiriquement par calage sur un point de fonctionnement, elle permettra de dire ce qu'il en adviendra du rendement à la suite d'une variation du débit à traiter.

Une fois arrivées à la surface collectrice, les particules vont constituer un dépôt plus ou moins cohérent qui devra être éliminé. Le procédé le plus courant consiste à frapper les plaques de manière périodique avec de gros marteaux. Des vibrations sonores peuvent aussi être employées.

3.2 Conception et design d'un électrofiltre

Dans un électrofiltre, les particules chargées vont, soumises à une force électrostatique, migrer vers la contre-électrode, plane ou cylindrique, où elles vont être collectées et sont supposées rester. Le mécanisme global est celui présenté figure II 6.

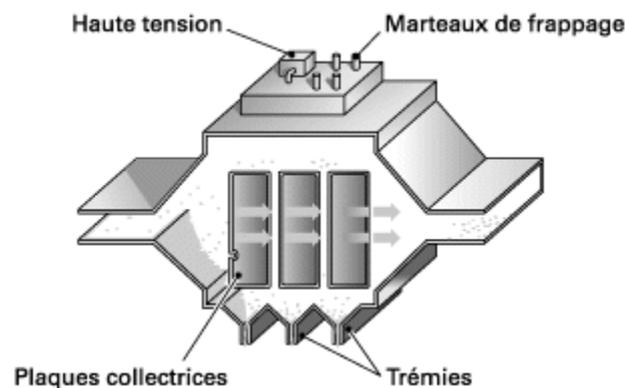


Fig.II.6 : Vue schématique d'un électrofiltre sec.

Les électrofiltres secs, qui n'ont que de faibles pertes de charge, sont particulièrement adaptés pour les très grands débits ($> 100\,000\text{ Nm}^3/\text{h}$), comme on en rencontre en génération d'énergie.

- **Tension /Intensité**

Un électrofiltre opère normalement dans une plage de tension comprise entre 40 kV et 100 kV (crêtes), plutôt vers le haut de la plage. Plusieurs types de régulation ont été proposés et visent à élever la tension autant que faire se peut jusqu'au seuil de claquage et à s'y maintenir. Il faut donc détecter les arcs naissants ou susceptibles de se produire par analyse des cycles $u = f(t)$ et $i = f(t)$, t étant le temps. Une grande activité de recherche et plusieurs brevets existent sur la question. Des valeurs typiques d'intensité sont de 0,1 à 0,5 mA/m² de surface.

- **Design des électrofiltres**

- **Partie mécanique**

Des plaques en tôles pliées sont les plus courantes ; elles ont un espacement compris entre 15 et 30 cm, voire 50 cm. Des formes variées, en W, en S, en zigzag ont été essayées, à la fois pour augmenter la rigidité et pour diminuer le réentraînement. Il faut se souvenir que plus l'espacement est important, plus le voltage à appliquer devra être important. Il est possible d'avoir des formes encore plus complexes qui permettent d'obtenir un champ électrique non uniforme. Beaucoup plus coûteuses, ces plaques ne se sont pas jusqu'ici imposées. Très souvent, les électrofiltres sont agencés en plusieurs modules fonctionnant les uns derrière les autres, chacun possédant son propre système de contrôle. On parle d'électrofiltre à un champ, deux champs ou trois champs. Avec des cendres volantes d'incinération, un électrofiltre à un champ atteint facilement 100 mg/Nm³ de poussières, à deux champs 50 mg/Nm³ et à trois champs 20 mg/Nm³.

- **Électrodes**

Plusieurs formes d'électrodes ont été essayées, depuis les simples fils jusqu'à des formes assez découpées présentant des arêtes vives. Ce type d'électrode, plus rigide qu'un simple fil, est actuellement préféré.

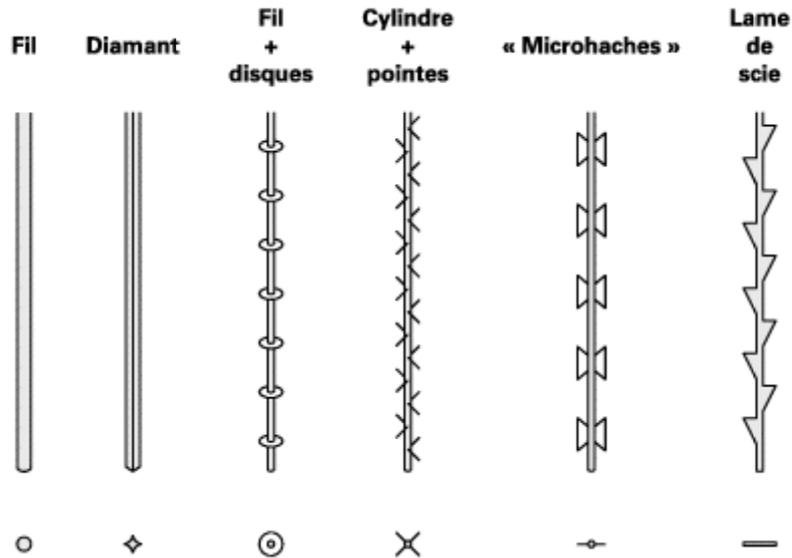


Fig.II 7 : Différentes formes commerciales d'électrodes d'émission

- **Plaques**

Le frappage des plaques réceptrices est en général effectué à l'aide de gros marteaux venant frapper, à intervalles fixes, les plaques dans le plan de la paroi. Des nettoyages par vibrations sonores, opérant à des fréquences de 50 à 350 Hz ont été proposés et donnent satisfaction. La partie électrique comporte des éléments élévateurs de tension et des thyristors. La puissance totale à installer est de l'ordre de 1 kW/1 000 Nm³/h.

- **Autres éléments**

La répartition des gaz à l'entrée est un paramètre important et une bonne homogénéité est obtenue par une grille ou de petites chicanes.

La sécurité est aussi un élément important, et il peut être nécessaire de placer des disques anti-explosion ainsi que des capteurs permettant de détecter une situation pouvant donner naissance à un incendie (capteur de température, de CO et de CO₂). Un calorifugeage est parfois utile.

- **Précharge**

Certains électrofiltres ont recours à une précharge. Dans une telle configuration, la décharge *corona* se fait autour d'électrodes qui vont induire un champ hautement non uniforme. Ce sont en général des électrodes filaires, placées en regard de contre-électrodes cylindriques à la masse. Cela précharge les particules, qui sont ensuite collectées entre des plaques entre lesquelles règne un champ plus uniforme. La différence de potentiel peut être plus importante dans l'étage de précharge, et l'écartement interplaques est réduit dans l'étage

de collection. Ainsi, au prix d'une complexité un peu accrue, on peut réduire la taille globale de l'équipement.

Conclusion

Finalement, il existe deux techniques utilisées pour le dépoussiérage :

- Les filtres à manche ;
- Les filtres électrostatique.

Aussi, il est apparu différents solutions intervenants qui sont appelés filtre hybride que nous allons présenter dans le chapitre qui va suivre.

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier le cas du filtre hybride, filtre qui se trouve en amont du four de la ligne II. Le problème principal qu'il y a dans le filtre hybride est que ce dernier se met à cracher la poussière par sa cheminée d'une façon excessive et ce au bout d'une durée très courte après sa mise en service, notamment lors de la dernière mise en service après l'arrêt du 30 Mars. Et alors qu'ils devaient tenir plus de 3 ou 4 ans, les manches s'usent au bout 3 ou 4 mois. Par conséquent, LAFARGE se voit contrainte de changer les quelques 1092 manches du filtre, qui coutent plus de 1250 DH chacune, sans parler du manque à gagner, ce qui fait que l'usine perd entre trente et cinquante milles Dirhams à chaque fois.

Notre mission donc est de déceler l'origine de ces défaillances, et de proposer un plan d'action qui résoudra d'une façon définitive ce problème d'émission de poussières. Pour ce, nous allons procéder par une analyse AMDEC, dans laquelle nous allons décortiquer chaque partie du filtre pour en représenter les pannes potentielles ainsi que leur causes et les solutions qui vont avec. Dans un deuxième temps, on va faire une analyse avec la méthode 5M ou diagramme d'Ishikawa pour entrer plus dans le vif du sujet, filtrer les causes, traiter d'une façon spécifique le cas du filtre hybride, et proposer une solution qui sera adaptée spécialement à notre cas .

1 Filtre hybride

1.1 Présentation

La tendance mondiale dans le domaine de dépoussiérage est ce substituer la technologie de filtration électrique par celle qui repose sur les manches, mais il se trouve que le coût de conversion de la technologie est onéreux et nécessite des investissements colossaux, chose qui a conduit à l'apparition de plusieurs solutions et technologies intermédiaires.

Donc dans un souci en premier lieu économique et dans le but de pouvoir exploiter les avantages des deux technologies, on a conçu une nouvelle technologie hybride.

1.2 Principe

Le filtre à manches est installé en aval d'un filtre électrique, donc l'air poussiéreux passe par la partie électrostatique pour une première filtration avant de passer dans le filtre à manches pour être totalement épuré.

Les filtres à manches fonctionnent à des vitesses de filtration plus élevées que d'habitude grâce au fait qu'une partie des particules est captée par le ESP, cette vitesse peut atteindre jusqu'à 4 fois la vitesse normale recommandée par le constructeur. Les manches sont installés dans un caisson intégré ou séparé en lieu et place du dernier étage électrostatique, et le décolmatage est de type « Off-Line ».

Ce type de filtre se distingue par une compacité élevée grâce aux vitesses de filtration élevées, mais le revers de la médaille est que les manches se déchirent trop vite à cause de cette même vitesse [3].

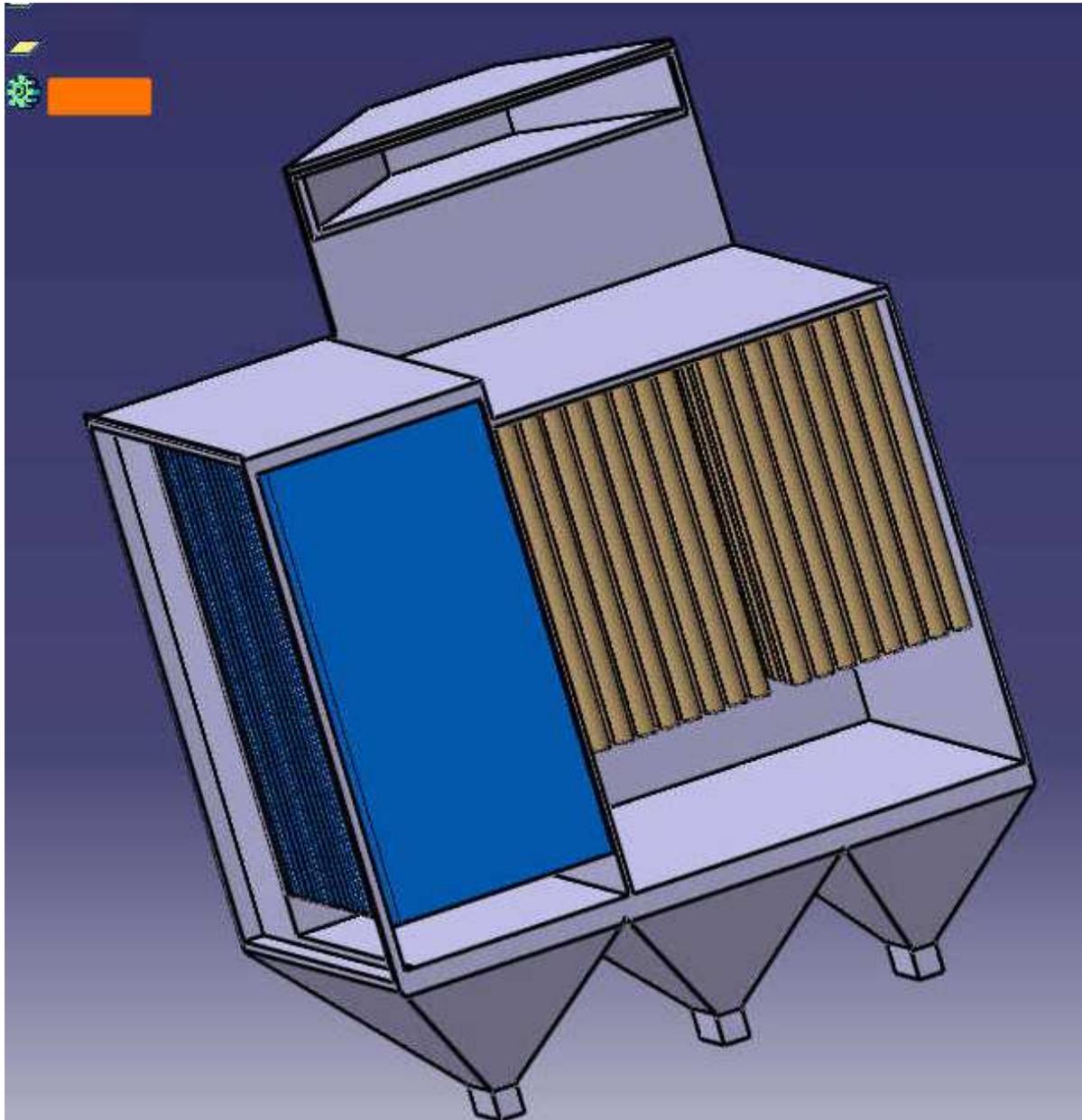


Fig.III.1 : Filtre Hybride

2 Analyse AMDEC

En premier temps, nous allons commencer par définir la méthode AMDEC et ses différentes étapes, ensuite nous allons présenter les différents critères d'évaluation de la criticité et finalement on va analyser les modes de défaillance du filtre hybride.

2.1 Définition

L'AMDEC : Analyse des Modes de Défaillances, de leurs Effets et leurs Criticité(Norme AFNOR X60-150), est une méthode d'analyse de système qui permet à partir des fonctions et des composants(suivant les multiples méthodes utilisées) de définir les modes de défaillance, de rechercher les causes et leurs effets, d'évaluer leur criticité et de proposer des actions pour les réduire, dans le cadre du concept « sûreté de fonctionnement ». Dans certains cas, l'AMDEC peut être complétée par une analyse et diagnostic pour avoir une meilleure vue d'ensemble.

2.2 Types et approches AMDEC

Pour aborder une étude AMDEC, on distingue deux approches possibles :

- Une approche prévisionnelle : nous analysons dans ce cas les défaillances potentielles dès la phase de conception.
- Une approche opérationnelle : nous nous contentons cette fois-ci de l'analyse des défaillances déjà observées lors de l'exploitation.

Par ailleurs, et suivant les objectifs visés, une étude AMDEC peut être :

- Une AMDEC produit ;
- Une AMDEC processus ;
- Une AMDEC Machine ;

Le tableau ci-dessous illustre les objectifs de chacun de ces types :

Type d'AMDECs	Objectifs
AMDEC Produit	Analyse de la conception d'un produit pour améliorer la qualité et la fiabilité de celui-ci.
AMDEC Processus	Analyse opérationnelle de la production pour améliorer la qualité du produit.
AMDEC Machine	Analyse de la conception et/ou l'exploitation d'un moyen ou équipement de production pour améliorer la disponibilité et la sécurité.

Tableau III.2. : Types d'AMDEC

Notre but étant l'amélioration de la disponibilité du filtre hybride, on développera uniquement l'AMDEC machine de ce dernier.

2.3 Méthodologie de l'AMDEC machine

L'AMDEC s'appuie sur une méthodologie très structurée composant cinq étapes :

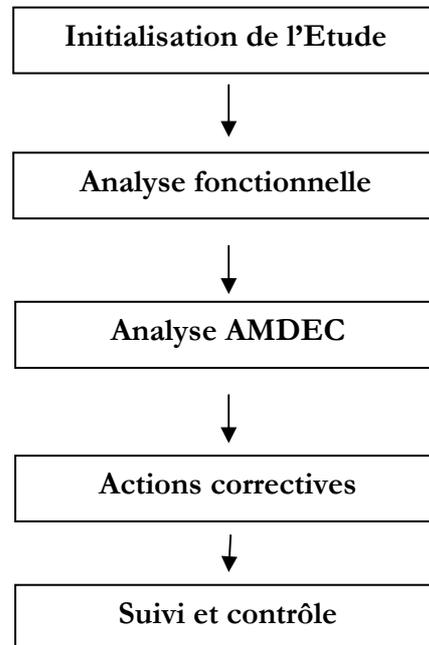


Fig.III.3 : Méthodologie AMDEC.

2.4 Initialisation de l'étude

L'initialisation de l'AMDEC est une étape préliminaire durant laquelle on a procédé à :

- La définition du système étudié que l'on a nommé le système de dépoussiérage et qui a pour fonction l'aspiration de l'air chargé de poussières, la filtration de celui-ci, le refoulement de l'air épuré et l'évacuation de la poussière à l'endroit indiqué à cet effet.
- La définition des objectifs et des causes de l'étude :

Le filtre hybride se trouve en amont du four 2, il présente plusieurs problèmes, essentiellement l'émission des poussières de façon excessive dépassant les seuils permis par la norme, et avec un taux dépassant parfois les 300g/m^3 , rendant ainsi l'environnement de travail sale et nuisant à la santé des intervenant et des habitants et entraînant même des dysfonctionnements dans le processus pouvant aller même jusqu'à l'arrêt de la ligne de production, et ce une très courte durée après avoir exécuter une action de maintenance radicale à chaque fois. C'est pourquoi il est primordial de trouver un plan d'action qui fera que les taux de poussières rejetés soient acceptables.

Ainsi nous nous sommes fixé comme objectif d'identifier les causes de ce mauvais fonctionnement afin d'élaborer un plan d'action curatif approprié qui sera exécuté sur le champ ou bien au prochain arrêt de four si il nécessite une durée importante.

- La définition des limites de l'étude :

Le système que l'on va analyser contiendra les éléments suivants :

- La partie filtre à manches ;
- La partie ESP ;
- Le moto-ventilateur ;
- Le système pneumatique de décolmatage ;
- Les conduites d'aspiration et refoulement ;
- Le séquenceur ;
- Le système d'évacuation de poussière.

2.5 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle selon la Norme Française X 50-150 est une démarche qui consiste à recenser, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions du système étudié. Elle constitue une étape indispensable car il est nécessaire de bien connaître les fonctions du système pour en analyser ensuite les risques de dysfonctionnement, et elle facilité par la suite l'analyse des défaillances.

Le système est considéré, en première approche, comme une boîte noire dont la composition est totalement inconnue. C'est l'analyse fonctionnelle externe, elle passe par les étapes suivantes :

- Détermination des positions d'illustration ;
- Détermination du milieu extérieur ;
- Détermination des fonctions principales ;
- Détermination des fonctions contraintes ;
- Validation des fonctions.

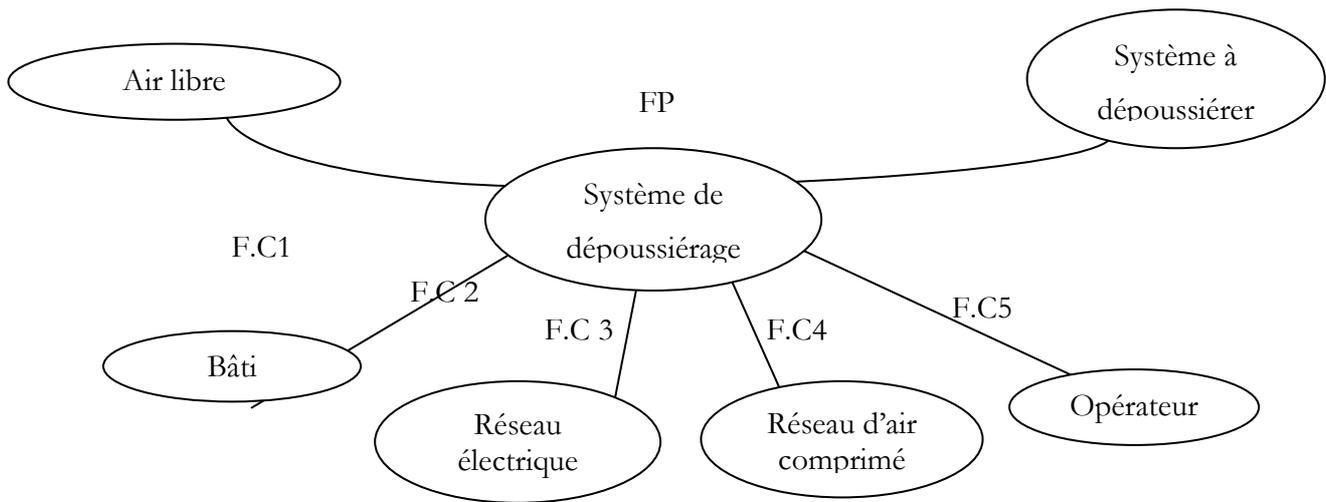


Fig III 4: Le Diagramme Pieuvre.

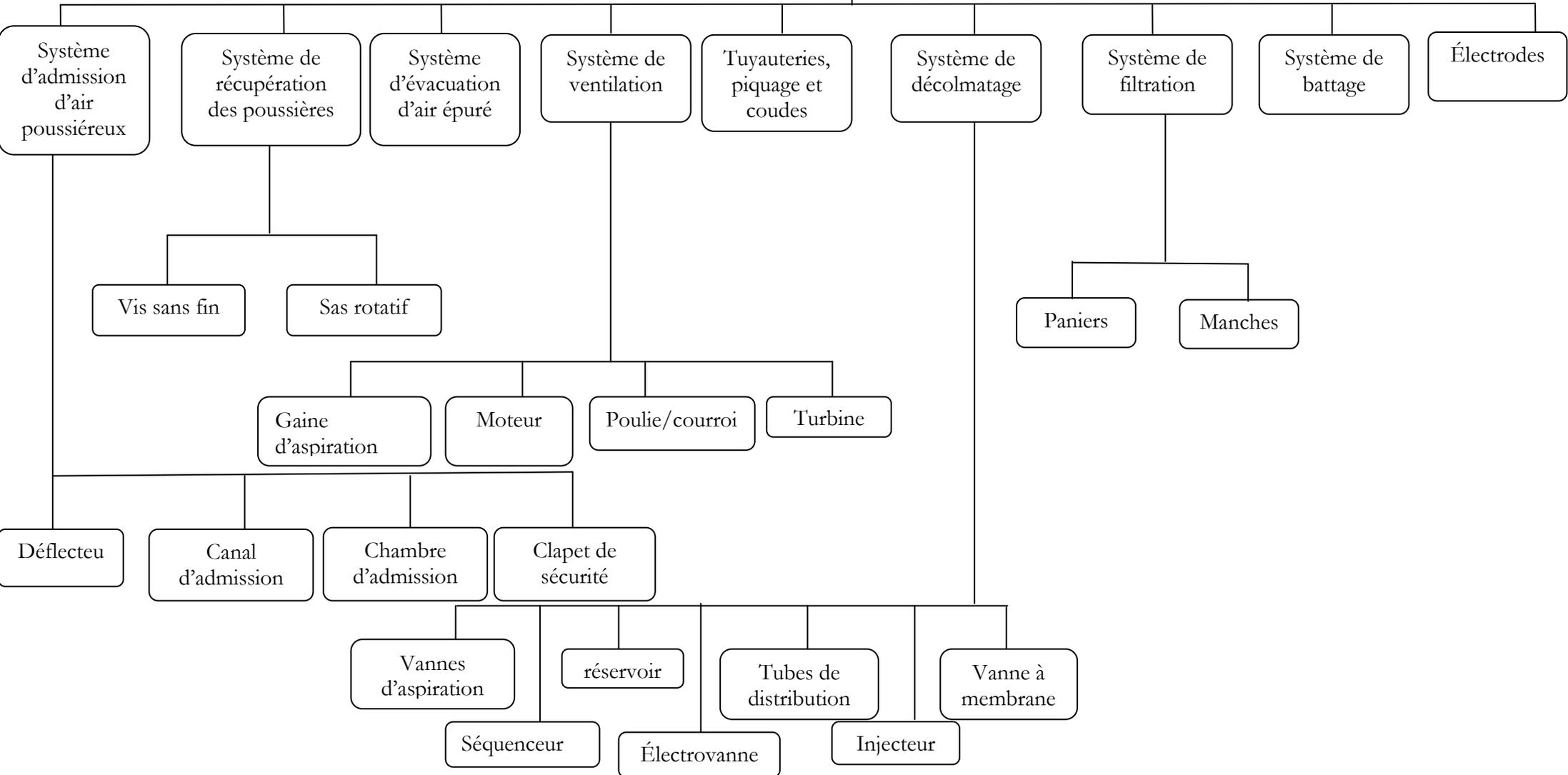
Donc la fonction principale et les fonctions contraintes sont :

- FP : dépoussiérer le « **système à dépoussiérer** » et refouler de l'air à faible teneur en poussières à l'extérieur ;
- F.C1 : respecter l'environnement ;
- F.C2 : supporter le filtre et l'installation ;
- F.C3 : Etre disponible et concordant ;
- F.C4 : Etre disponible et étanche ;
- F.C 5 : Etre accessible aux opérateurs pour les travaux de maintenance.

En deuxième lieu, on procède au découpage fonctionnel, à ce stade là, on entre dans la constitution du système où on a recours à la décomposition fonctionnelle qui utilise les résultats des études fonctionnelles de conception (cf page suivante).

Projet de Fin d'Etude
Chapitre III : Etude des filtres hybride

Système de
dépoussiérage



2.6 Evaluation de la criticité

a) Introduction

L'analyse AMDEC proprement dite consiste à identifier les dysfonctionnement potentiels ou déjà constatés au niveau du système, à mettre en évidence les points critiques et à proposer des actions correctives pour y remédier. Le tableau AMDEC sera le principal support de travail lors de cette étape.

b) Détermination des critères qualitatifs des défaillances

Selon la norme AFNOR X 60-500, une défaillance est la cessation de l'aptitude d'un élément à accomplir une fonction requise. On peut cerner chaque défaillance à l'aide de quatre critères qualitatifs qui sont : *le mode, la cause, l'effet et la détection* de la défaillance. Le mode de la défaillance étant la manière dont le système peut s'arrêter de fonctionner ou fonctionner anormalement, la cause étant l'anomalie initiale qui peut conduire à la défaillance, l'effet étant les conséquences subies par l'utilisateur du moyen de production, et la détection étant le phénomène pouvant être observé, mesuré ou bien détecté et qui relate avec la défaillance en question.

c) Evaluation de la criticité :

La criticité ou bien l'IPR est calculée à partir du produit de trois critères d'évaluation à savoir :

F : la fréquence d'apparition de la défaillance ;

G : la gravité des effets de la défaillance ;

D : la probabilité de non détection de la défaillance.

$$\mathbf{IPR = F \times G \times D}$$

Et on estime alors pour chaque combinaison : cause-mode-effet, les valeurs de F, G et D en utilisant des grilles de cotation prédéfinies (dans l'annexe, tables AMDEC).

Conclusion :

Au niveau de l'analyse AMDEC, la défaillance la plus critique est :

- colmatage du filtre d'air.

Dans le paragraphe suivant nous allons analyser ces défaillances pour remonter aux causes racines pour ce faire nous allons utiliser le diagramme D'Ishikawa.

3 Analyse et diagnostique du filtre hybride

3.1 Définition du diagramme d'Ishikawa

Le diagramme d'Ishikawa ou diagramme de causes-Effets est un outil graphique qui sert à comprendre les causes d'un défaut et à analyser le rapport existant entre un problème et ses causes.

Principe : la construction du diagramme d'Ishikawa est basée sur une travail de groupe, pour ce faire, j'ai organisé des réunions avec les techniciens et ingénieurs qui se chargent des interventions sur les filtres. Pour construire le diagramme d'Ishikawa, il faut :

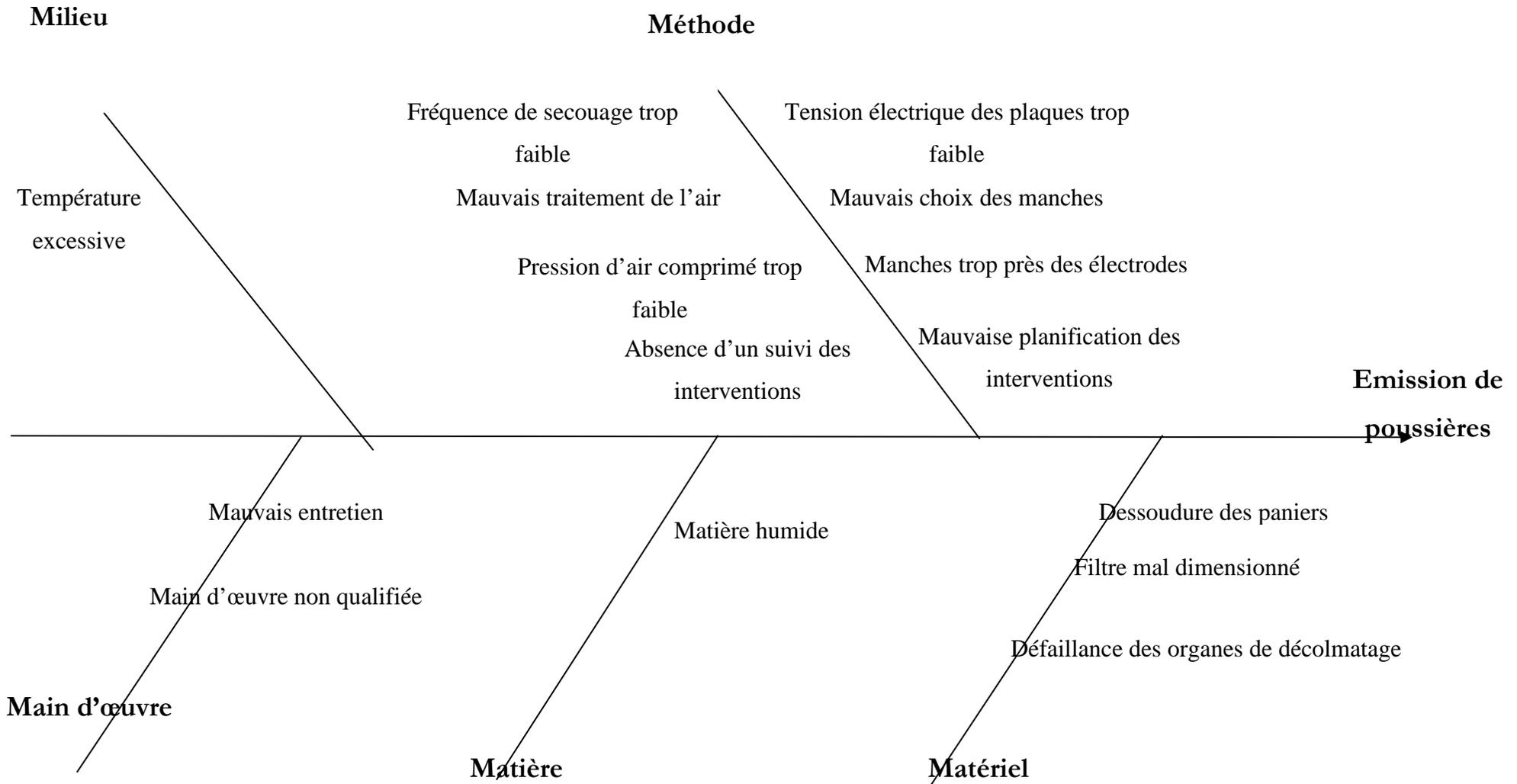
- Organiser un brainstorming et trouver toutes les causes possibles aux défaillances.
- Classer les causes en 5 familles principales : Milieu, Matière, Matériel, Méthodes et Main d'œuvre.
- Apprécier la ou les causes principalement responsables.
- Vérifier les options.
- Agir sur la ou les causes pour corriger le défaut en donnant les solutions.

3.2 Analyse et diagnostique du filtre

A la base des fiches relatives au filtre et selon le brainstorming qu'on a fait, la défaillance la plus fréquente est l'émission des poussières qui peut être causée par :

- Température excessive ;
- Fréquence de secouage trop faible ;
- Mauvais traitement de l'air comprimé ;
- Pression d'air comprimé faible ;
- Tension en volt des électrodes trop faible ;
- Dessoudure des paniers ;
- Manches trop près des électrodes ;
- Matière humide ;
- Filtre mal dimensionné ;
- Filtre sous dimensionné ;
- Mauvais choix des manches ;
- Défaillance des organes de décolmatage ;
- Mauvais entretien ;
- Mauvaise planification des interventions..

Les différentes classes de causes sont reportées sur le diagramme d'Ishikawa suivant :



3.2.1 Causes liées au milieu

Température excessive : le filtre travaille à peu près à 240°C alors que nous travaillons avec des manches filtrantes à base de feutre en polyester qui supportent des températures d'emploi pouvant aller jusqu'à 260 degrés, cette hypothèse est donc à prendre en considération, car il pourrait avoir des pics de température qui peuvent dépasser la T° maximale des manches. Et il se peut que l'on aurait à changer la qualité des médias.

Les manches utilisées sont des médias filtrants à base de feutre polyester qui peuvent supporter des températures d'emploi allant jusqu'à 240°C, alors que la température maximale qu'il peut atteindre est 120°C, cette hypothèse est donc à écarter.

3.2.2 Causes liées à la matière

L'air chaud est introduit dans le filtre à une température moyenne de 120°C, et elle n'est pas contaminée ni par l'huile ni par l'eau qui pourrait colmater la matière sur les manches du filtre, cette hypothèse est donc aussi à écarter.

3.2.3 Causes liées aux méthodes

a) Période de secouage trop faible :

La Période de décolmatage de ce filtre est de 12s, et les constructeurs des filtres recommandent une fréquence entre 10 et 20 secondes, ceci dit, nous allons augmenter la fréquence de secouage jusqu'à 8 secondes pour pouvoir dégager les poussières précipitées sur les manches. C'est vrai que ça va user les manches mais ça aurait aussi un bon effet. En effet, plus les manches sont « propres », plus le débit d'air traversant les médias serait important et la filtration serait plus efficace.

b) Mauvais traitement de l'air comprimé :

L'air utilisé pour le secouage provient d'un réseau d'air comprimé, l'air est filtré avant l'injection au moyen d'un filtre régulateur en bon état et bien maintenu sauf quelques incidents mineurs. Cette hypothèse est donc aussi à écarter.

c) Pression d'air comprimé insuffisante :

On écarte cette hypothèse car la pression de décolmatage utilisée est de 6,5 bars, alors que la pression qu'on nous a recommandé est d'environ 5,5 bars.

d) Champ électrostatique trop faible :

La tension normale qui circule dans les électrodes n'atteint pas la tension nominale qui est de 111KV, et c'est dû à un défaut dans le concept même. En effet, les électrodes sont alimentées par un courant monophasé de 380V, qui passe par un transformateur de tension

puis un régulateur. Ce qui se passe donc, c'est que dès qu'on atteint une certaine épaisseur de couche (gâteau), on tombe dans une sorte de court circuit qu'on appelle amorçage, et donc le régulateur fait chuter la tension jusqu'à ce qu'on puisse arriver au désamorçage pour que la tension puisse remonter encore vers sa valeur nominale. Donc le problème qui se présente est un problème de régularité et de permanence dans la valeur du champ. La conséquence de tout cela est que la partie électro-filtre ne capte pas les 80% de poussières qu'elle doit capter, ce qui fait que le taux de poussières qui passe vers la partie filtres à manches est trop important. Pour pallier à ce problème, on a proposé d'augmenter la fréquence de battage des électrodes, comme ça l'épaisseur du gâteau de poussière va se rétrécir de façon à ce que l'on atteigne pas le seuil minimal d'amorçage.

e) Manches trop proches des plaques :

On a remarqué que les manches se trouvent à une distance trop petite des plaques de l'ESP, ce qui fait qu'à chaque fois que le courant atteint une certaine valeur, les plaques tirent les paniers envers elles, et donc on a un nouveau court circuit local qui fait chuter la puissance de filtration. Aussi les manches peuvent se déchirer à cause de la température élevée des plaques et à cause des frottements entre panier et plaques. Pour remédier à ce problème, on a proposé de boucher toute une rangée de manches (26 manches) pour éloigner ces dernières des plaques, d'autant plus que la distance minimale conseillée est de 60cm alors qu'on se trouvait à moins de 20 cm. L'inconvénient qu'il y aura est que la surface filtrante sera amputée d'à peu près 91,43m², mais vu que notre surface filtrante totale est de 3480,95m², cette diminution n'aura pas un impact important.

f) Mauvais choix des manches :

Comme on l'a cité précédemment, le filtre hybride travaille à une température très élevée, ce qui favorise les attaques chimiques ainsi que les brûlures des manches, surtout s'il y a un défaut de calorifugeage, chose qui est difficile, très difficile à déceler, d'ailleurs lors du dernier arrêt on a trouvé quelques manches brûlées que l'on a aussitôt remplacés. Donc comme solution, j'ai proposé, après consultation d'un expert en dépoussiérage, de changer les manches existantes, et d'installer de nouvelles manches à base de PTFE, qui ont une bonne tenue en hautes température, et qui sont de bons résistants à l'humidité et à l'huile.



Fig. III.5 : Photo d'une manche brûlée.

g) Mauvaise planification des interventions :

En effet, parfois on tarde à intervenir sur le filtre, et ce retard cause la dégradation des manches, des vannes, ou bien des organes en général du filtre. Il va falloir alors réorganiser les rondes de visites ainsi que le temps de réponse des interventions sur le filtre.

h) Absence de suivi sur les filtres :

En effet, on a tendance à se charger des organes défaillant en les changeant et nettoyant et on oublie les autres, alors qu'au fil des mois, les autres manches, par exemple, s'usent par fatigue et vieillissent. Donc notre application de gestion de la maintenance des installations de dépoussiérage que l'on a conçu auparavant va permettre cette opération.

3.2.4 Causes liées aux matériels

a) Conception du filtre :

En effet, lors de nos inspection de l'état du filtre et plus précisément celui du caisson d'air propre, on a constaté que la poussière d'agglomère d'une façon spectaculaire et ce dans une région bien précise du caisson (cf Fig III 5).

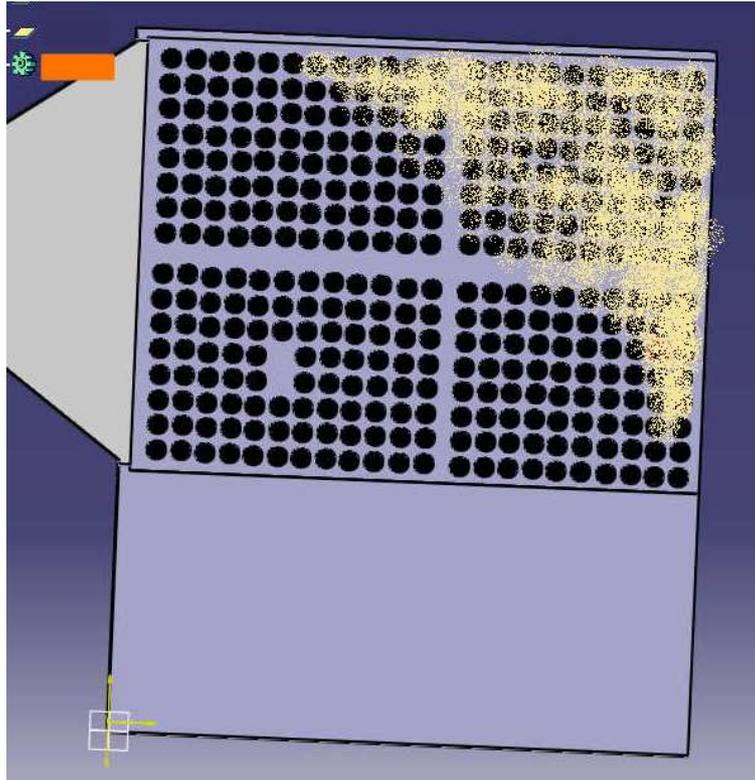


Fig. III.6 : Répartition de la poussière dans le caisson d'air propre



Fig. III.7 : Photo de la répartition de la poussière dans le caisson d'air propre.

En analysant l'état du caisson ainsi que la répartition de la poussière dans le caisson, surtout la façon dont cette dernière est éparpillée dans le caisson, on a pu conclure qu'il existe un problème d'aéraulique. En effet, l'air propre effectue un mouvement non rectiligne selon la trajectoire explicitée dans la figure XX4, ce qui fait que le débit d'air favorise le passage direct du point 1 au point 3(en bleu). Bien sûr il y a une certaine quantité d'air qui passe par le point 2(en rouge), mais avec une vitesse assez faible, ce qui fait qu'une quantité importante de

poussière migre de tous les coins du caisson et se sédimente dans ce coté là, car il y a toujours une certaine quantité de poussière dans l'air « épuré » aussi propre qu'il puisse être.

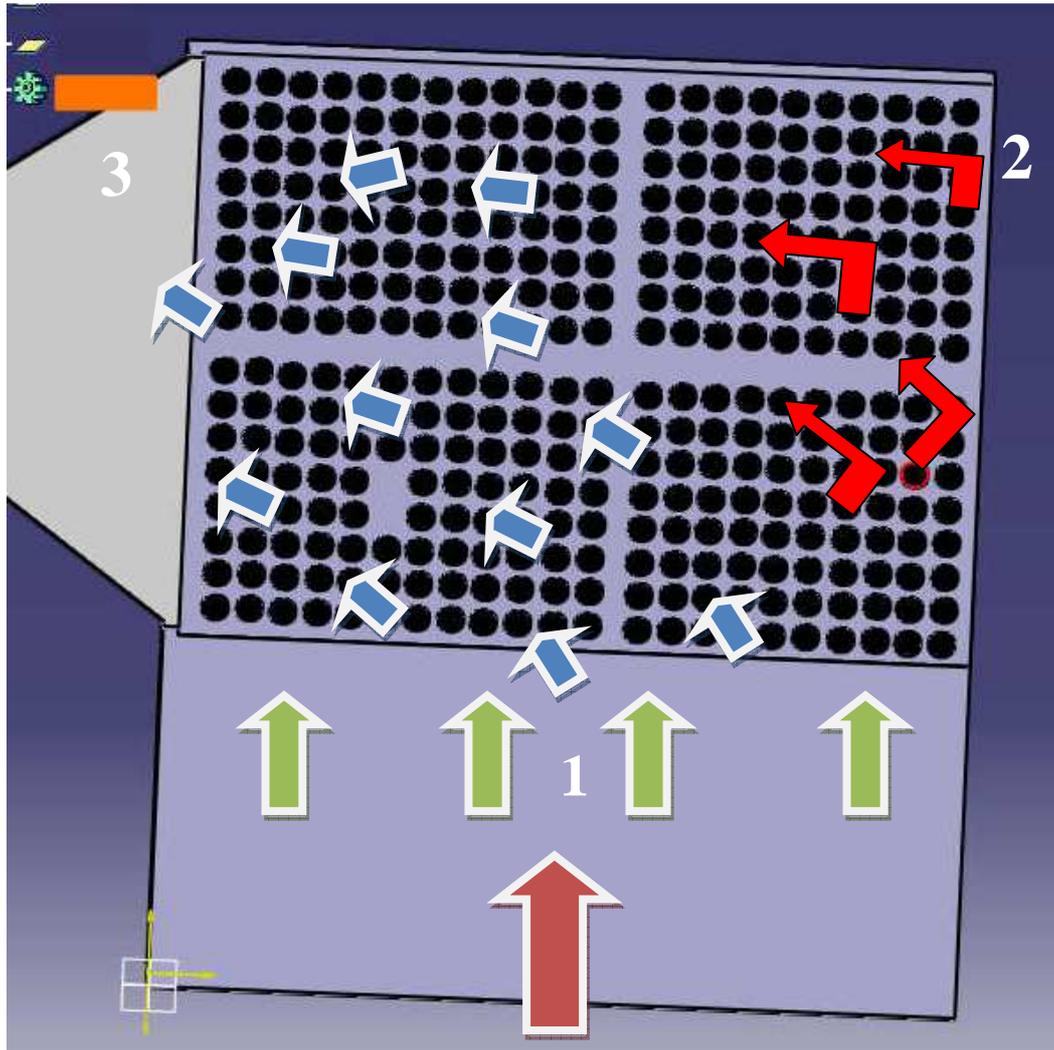


Fig. III.8 : Trajectoire de l'air dans le caisson d'air propre.

Il y a aussi un autre point, quand le débit d'air sale arrive à la partie filtre à manches, les deux premiers compartiments qui se trouvent dans la partie qui jouxte la partie ESP se trouve surchargé en poussière, ce qui fait qu'elle se colmate rapidement et que tout le travail de filtration se fait alors par la deuxième partie.

Donc pour pallier au premier problème, on a proposé une solution radicale qui consiste en le changement de la position de la gaine de tirage, pour que l'air n'ait pas à faire ce mouvement de 90°, ce qui amènera une certaine aisance dans le mouvement d'air (cf. fig. III 8). C'est une solution coûteuse mais qui est nécessaire pour éliminer une fois pour toute ce problème d'aéraulique. Pour ce qui est du second problème, on a proposé d'installer une plaque diffusante qui facilitera le passage de l'air sale vers les parties les plus éloignées du filtre.

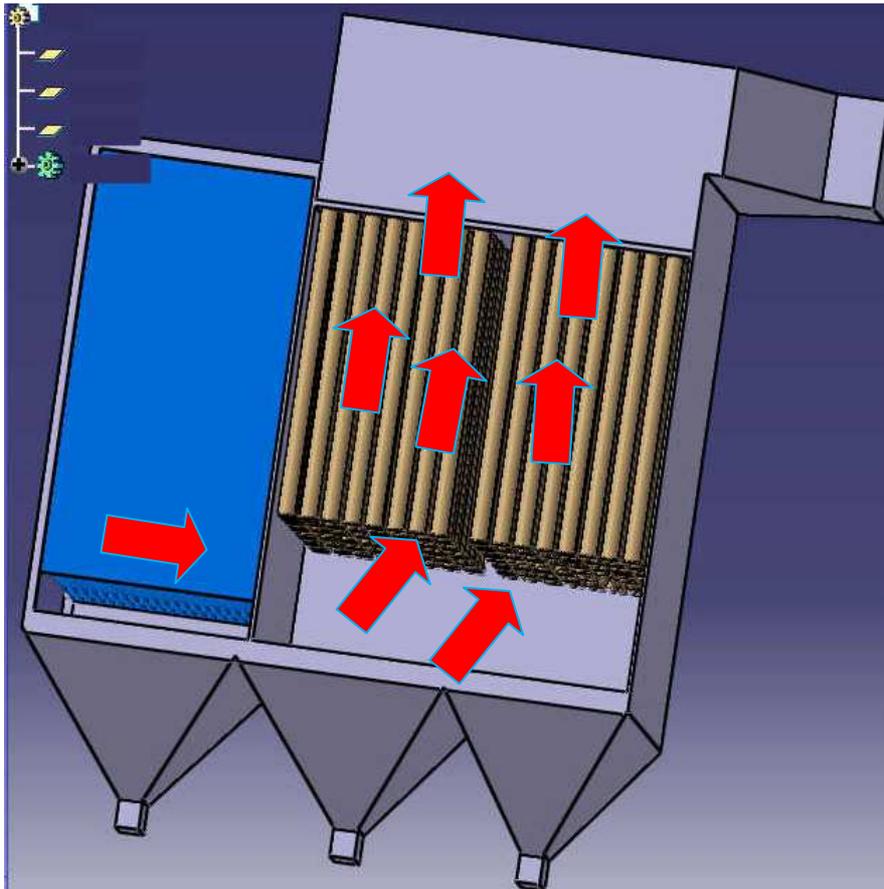


Fig. III.8 : Filtre avec gaine déplacée.

b) Dessoudure des paniers :

Nos paniers sont formés de deux étages séparables, et liables par encliquetage, mais cette liaison n'est pas assez forte pour supporter la turbulence de l'air qui se passe dans le caisson d'air sale, ce qui fait que le panier se divise en deux parties, une première partie qui reste droite et fixée sur la tôle d'assise des mannequins, et une seconde partie qui est suspendue à la première et qui n'est pas bien fixée, ce qui fait qu'elle bouge dans tous les sens et par voie de conséquence, touche les autres manches, et donc on a des frottements et des chocs qui déchirent les manches.

c) Défaillance du système de décolmatage :

Se référer aux tables AMDEC.

Conclusion

Le diagnostic du filtre hybride a été très fructueux, puisque après avoir effectué les interventions proposées, à savoir le bouchage d'une rangée de manches, l'augmentation de la fréquence de secouage des manches et de battage des électrodes, on n'a plus eu de problème d'émission de poussière depuis près de deux mois déjà. Mais l'état de la tôle qui se trouve en face du sens d'accès de l'air sale a été très affecté par les turbulences qui ont lieu à cet endroit du caisson d'air sale, et donc le changement de l'emplacement de la gaine de sortie d'air propre doit impérativement être effectué dans un avenir proche, de peur de se retrouver avec le caisson percé, ce qui causera pas mal de problème au niveau du calorifugeage ainsi que des fuites dans des endroits difficiles à colmater.

Un autre problème que l'on a noté également, c'est l'absence d'historique spécifique aux filtres de dépoussiérage, cet historique doit impérativement exister pour pouvoir adopter un comportement spécifique vis-à-vis de chaque filtre et pouvoir entreprendre des interventions spéciales et non classique visant à remédier de façon plus efficace aux problèmes rencontrés selon leurs natures et leurs redondances, et aussi pour pouvoir calculer les fiabilités, les temps d'arrêts ainsi que l'indice de disponibilités de ces filtres. C'est pourquoi le chapitre suivant sera dédié a la conception d'un logiciel qui offre la possibilité de générer des historiques des défaillances et des pannes que subissent l'ensemble des filtres d'usine, la nature de ces pannes, leurs redondances ainsi que la nature des opérations de maintenance qu'ils subissent.

Introduction

La Gestion de la maintenance au sein de LAFARGE se fait grâce à un progiciel qui s'appelle MAXIMO, ce logiciel est bien généraliste et permet le management de toutes les machines existantes dans notre usine. Par contre, il ne permet pas le management spécifique de chaque type de machines, car l'hierarchisation des installations qui est sur ce support est faite par secteur, et non par type de machines. Par voie de conséquence, on pouvait faire un suivi spécifique à chaque machine, mais pas pour chaque type de machines, et plus précisément des filtres de dépoussiérage dans notre cas, surtout que ce type de machine existe dans tous les secteurs de l'usine, et subit plusieurs pannes de multiples natures, causes et origines.

Nous avons donc cherché si cette option est disponible sur le logiciel installé auparavant. On a trouvé qu'elle existait mais dans un module complémentaire qui va nous permettre de créer une nouvelle indexation des machines permettant le pointage sur le type de machine sans pour autant toucher à la hiérarchie déjà établie. Donc on devait acheter ce module de chez MRO-Software, compagnie qui a conçu MAXIMO, et on allait aussi devoir former les techniciens du bureau de méthodes sur ces nouvelles fonctionnalités.

Lorsqu'on a calculé ce que ça va nous coûter, entre prix d'achat du module et indisponibilité des techniciens lors de la formation, on a dû opter pour le deuxième choix que j'ai proposé, et qui consiste en la conception d'une application informatique qui sera dédiée spécialement aux installations de dépoussiérage, qui permettra la présentation des caractéristiques de tous les filtres, la gestion des interventions ainsi que la génération de suivis pour chaque filtre. Pour cela, on a élaboré au début une base de données contenant l'ensemble des filtres triés par ateliers, avec toutes leurs caractéristiques et celle de leurs médias, puis on a conçu l'interface de notre application sous Visual Basic 6.

1 Application informatique(GEMAFIL)

Dans ce paragraphe nous allons présenter les différentes étapes de la conception de l'application informatique GEMAFIL a savoir :

- collecte des données.
- élaboration du MCD.
- conception des interfaces utilisateur.

1.1 Collecte des données

Cette étape nous a pris beaucoup de temps, à peu près 8 semaines. En effet, on devait à chaque fois partir au milieu des installations dans le but d'auditer l'état des filtres, c'est-à-dire voir s'il est en marche ou non, et ensuite en extraire les caractéristiques techniques ainsi que celle des médias filtrants. Cette opération nous a pris beaucoup de temps d'abord à cause du nombre important des filtres de dépoussiérage installés dans tous les ateliers de l'usine(64 filtres), et aussi à cause de la politique de sécurité de Lafarge, et qui interdit aux stagiaires de sortir à l'usine sans être accompagnés par un membre de Lafarge, ce qui faisait que parfois j'attendais des jours avant de pouvoir sortir auditer un filtre.

Parfois on rencontrait un autre genre de problème, c'est celui de l'absence d'informations techniques. On avait deux cas de figure, ou bien on n'avait pas de documents du constructeur, mais il y avait la plaque signalétique, ou bien tous les deux sont absents. Dans le premier cas, on se référait à l'explication de la plaque signalétique fourni par le constructeur (voir schéma IV.1), ensuite on prend le soin de vérifier le tout en inspectant méticuleusement le filtre. Dans le second cas, on consulte les documents techniques, puis effectue des mesures et inspections pour confirmer les informations trouvées dans les catalogues constructeurs.

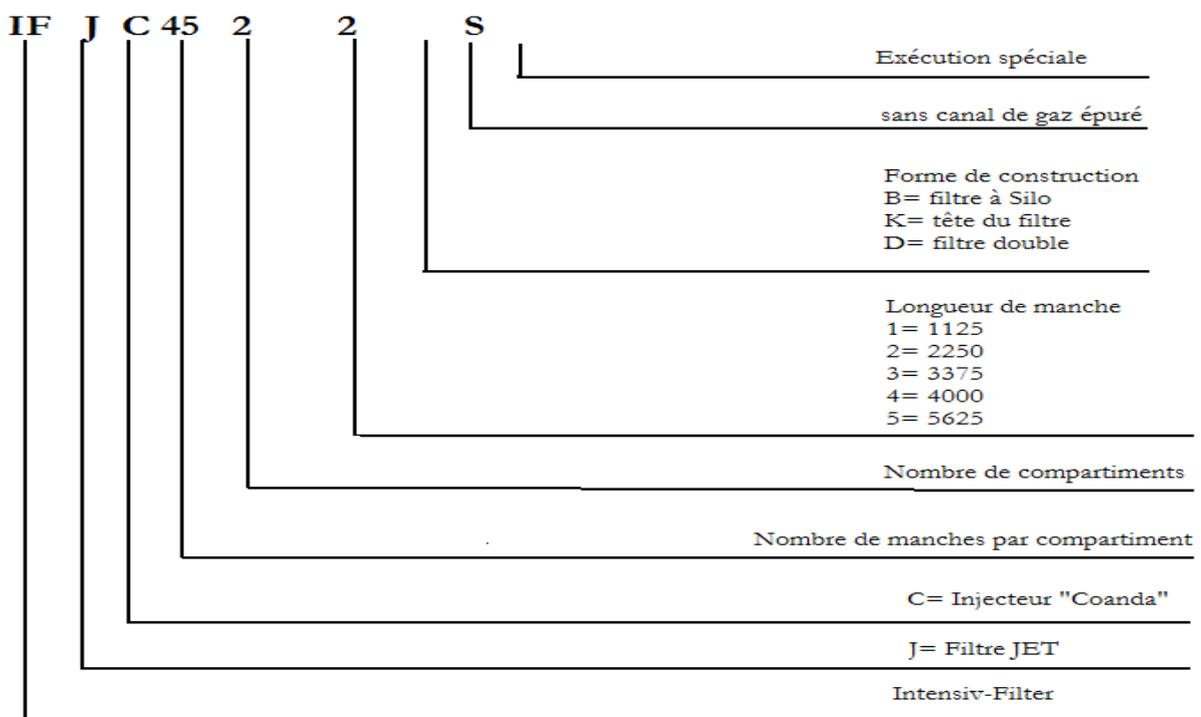


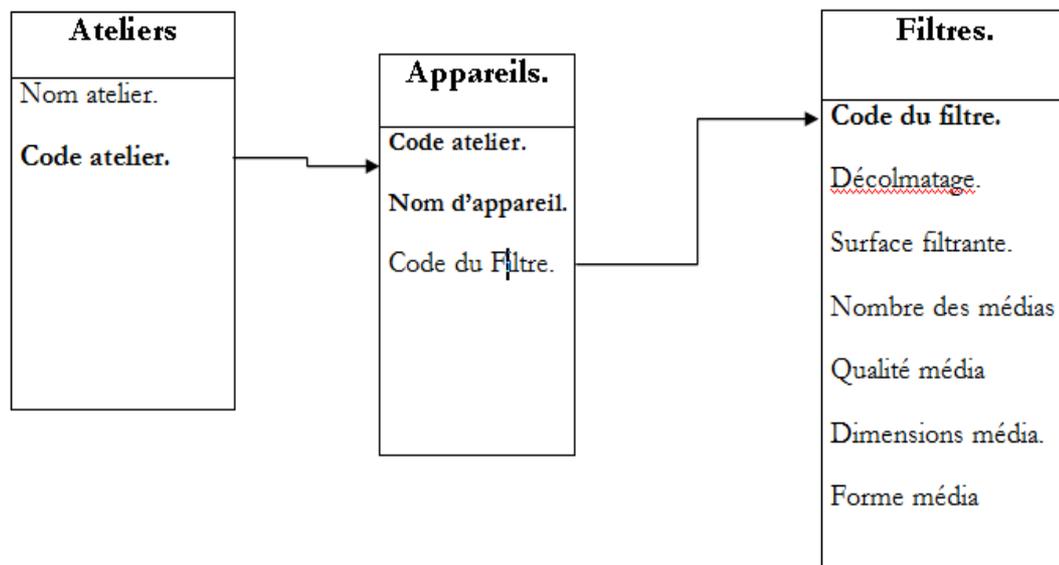
Fig.IV.1 : Explication de la plaque signalétique des filtres Intensiv.

Le fruit de ce long et onéreux travail qui a duré plus de 7 semaines est une liste exhaustive de l'ensemble des filtre de dépoussiérage installés dans tout l'usine, leurs caractéristiques techniques, ainsi que les caractéristiques de leurs médias filtrants. Vous pouvez trouver cette liste en annexe IV. Cette liste va nous servir de base de données sur lequel va agir notre logiciel, que l'on a baptisé « GEMAFIL », ainsi que de listing des filtres qui va être présenté aux sous-traitants lors de l'élaboration du cahier de charges du contrat de maintenance.

1.2 Elaboration du MCD

1.2.1 Lecture des informations filtres

Notre usine se compose de deux lignes de production distinctes MKS I et MKS II, ces mêmes lignes divisées en plusieurs parties explicitées lors de la description du processus de fabrication. Pour pouvoir donc faire une hiérarchisation de nos installations de dépoussiérage et pouvoir les retrouver en toute fluidité, on a subdivisé l'usine en 6 ateliers : 1) Liaison manège ; 2) BC1 BC2 et circuit poussière ; 3) Homo 1 et 2 ; 4) Fours 1 et 2 ; 5) CH3 BK3 BK4 BK5 ; 6) Ensachage. Chaque atelier contenant plusieurs appareils sur lesquels opèrent nos filtres. Donc pour ce qui est de la hiérarchisation des filtres et de leurs caractéristiques, on a crée trois tables organisées de la façon suivante :



Ainsi on a obtenu une hiérarchisation des installations de dépoussiérage permettant à chaque intervenant d'accéder facilement à n'importe quel filtre dans toute l'usine ainsi qu'aux informations qui lui sont associées de façon ordonnée et rapide.

1.2.2 Ajouts de données de maintenance

Le suivi des états des filtres, de leurs pannes et des interventions et modifications qui y sont faites étant l'objectif principal de GEMAFIL, il fallait créer une nouvelle base de données contenant les informations les plus significatives comme les dates des pannes, leurs natures, les interventions qui ont été exécutées, le nombre de pièces de rechange utilisées, le numéro du Bon de Travaux(BT)...etc. Ainsi on a créé une nouvelle table générale panne conçue comme suit :

Panne.
Nom de l'appareil.
Code du filtre.
Date de la panne.
Nature de la panne.
Numéro de BT.
Type d'intervention.
Nombre de média changés.
Observations.

Cette table étant bien générale, on pourrait alors filtrer ensuite les informations que l'on veut selon l'historique des pannes que subit le filtre d'un appareil, que subit une famille de filtres, selon la redondance d'une panne, le changement des médias... etc. ceci va être développé dans le paragraphe **II.5.**

2 Conception des interfaces utilisateur

Nous allons élaborer un ensemble d'interfaces qui vont permettre à l'utilisateur de faire la gestion des interventions sur les filtres et la communication avec la base de données. Dans la suite nous allons présenter ces interfaces.



Fig.IV.2 : Accueil de GeMaFil

2.1 Accueil

Cette page est celle de l'identification. En effet, on a instauré un certain ordre chez les utilisateurs en introduisant la notion d'administrateur et d'utilisateur normal. Un administrateur a des prérogatives telles que l'ajout d'appareils, de filtres et de changements de leurs caractéristiques... choses que ne pourront pas faire les utilisateurs normaux, ceux-ci n'ayant le droit d'accès aux informations techniques et aux listings qu'en lecture seule, il y a aussi l'option de changement de mot de passe qui se fait à la manière d'une messagerie web[10].

identifiez-vous

Login :

Mot de passe :

Modifier login et le mode passe

Nouveau Login :

Ancien mot de passe :

Nouveau mot de passe :

Confirmer le mot de passe :

Fig.VI.3 : Page 1 de GeMaFil Identification

2.2 Menu principal

Cette page permet le choix de l'atelier dans lequel se trouve l'appareil concerné, cette subdivision a été faite par secteurs, c'est-à-dire on a mêlé les secteurs de la ligne 1 à ceux de la ligne 2, ce classement est dû premièrement à notre chronologie de travail dans la recherche des informations techniques, et deuxièmement à cause de la similitude des appareils se trouvant dans les différents secteurs et des filtres qui y sont installées.

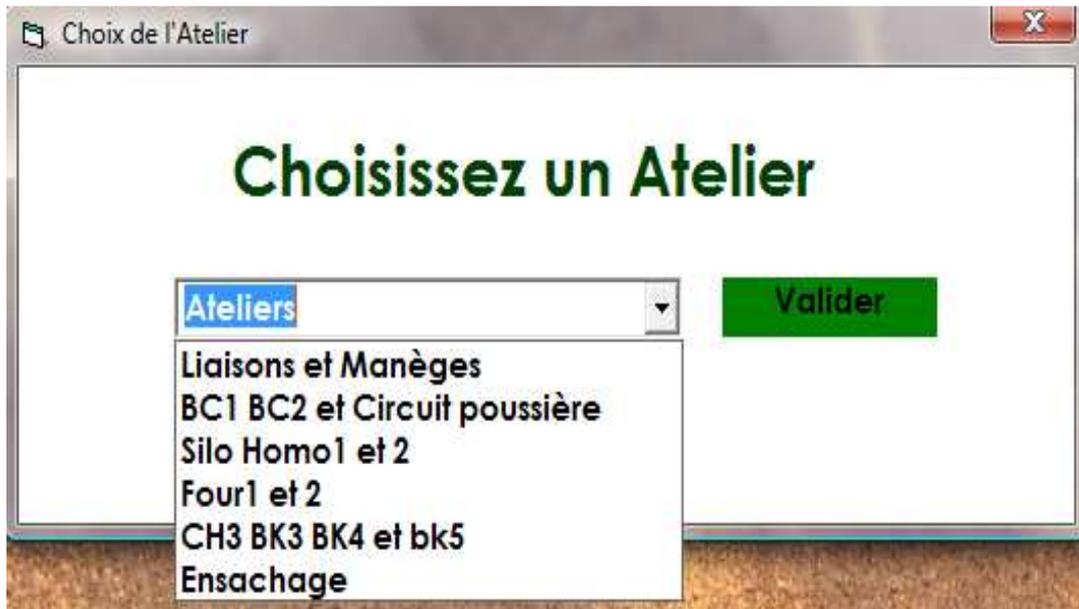


Fig.IV.4 : menu principal

2.3 Menu atelier

Sur ce menu, on peut distinguer la liste des appareils présents dans l'atelier choisi concernés par un filtre de dépoussiérage, une fois l'appareil coché, on peut accéder alors à trois options, on peut alors :

- Visualiser ces données techniques ainsi que celle de ses médias filtrants (Fig. IV.5).
- Signaler une panne qui s'y est introduite et entrer les données qui y sont relatives.
- Voir l'historique des pannes qui sont relatives à cet appareil (cf. \$5.).



Fig.IV.5 : présentation des appareils de chaque atelier



Fig.IV.6 : caractéristiques des filtres et des médias

2.4 Menu panne

Sur cette page on peut ajouter les informations relatives à une panne comme la date, la nature de la panne, la durée d'arrêt, l'intervention faite sur le filtre, le numéro de BT...

On peut remarquer que dès qu'on entre dans cette page, déjà le nom de l'appareil ainsi que celui du filtre qui lui est associé est déjà présent et figé puisque le choix de l'appareil et du filtre associé est déjà fait dans le menu atelier. Aussi, pour la case panne, on donne une liste dans laquelle on doit choisir la nature de la panne, ceci a pour but l'archivage de la redondance des pannes et pouvoir aussi faire un triage des pannes des filtre selon le type de la panne.

The screenshot shows a software window titled "Menu Nouvelle Panne" with a sub-header "Nouvelle Intervention". The form contains the following fields and values:

Nom de l'appareil	Haver 1 coté entrée
Type du Filtre	JC 45/3-2 KS
Date (jj/mm/aaaa)	04/07/2009
Nature de la panne	colorifugeage endommagé
Numéro du BT	0564
Nature de l'Intervention	soudage de la tole
Durée d'arrêt	0h
Nombre de manches remplacées	0
Observations	Revoir l'état de la tole intérieure

Buttons: "Ajout d'une nouvelle panne", "Enregistrer la panne", "Effacer les champs", "Retour", "Quitter".

Fig.IV.7 : Ajout d'une panne

2.5 Menu historique

Dans ce menu on peut visualiser l'historique des pannes et interventions faites sur les filtres de dépoussiérage, on distingue alors la date de la panne, sa nature, la nature des opérations de maintenance effectuées, leurs durée ainsi que le numéro du Bon de Travail pour avoir un élément de connexion avec MAXIMO. On a aussi ajouté une option de choix de la panne, pour voir la redondance des pannes sur nos appareils pour ainsi prévoir un comportement différent pour remédier une fois pour toute à ce genre de défaillance.

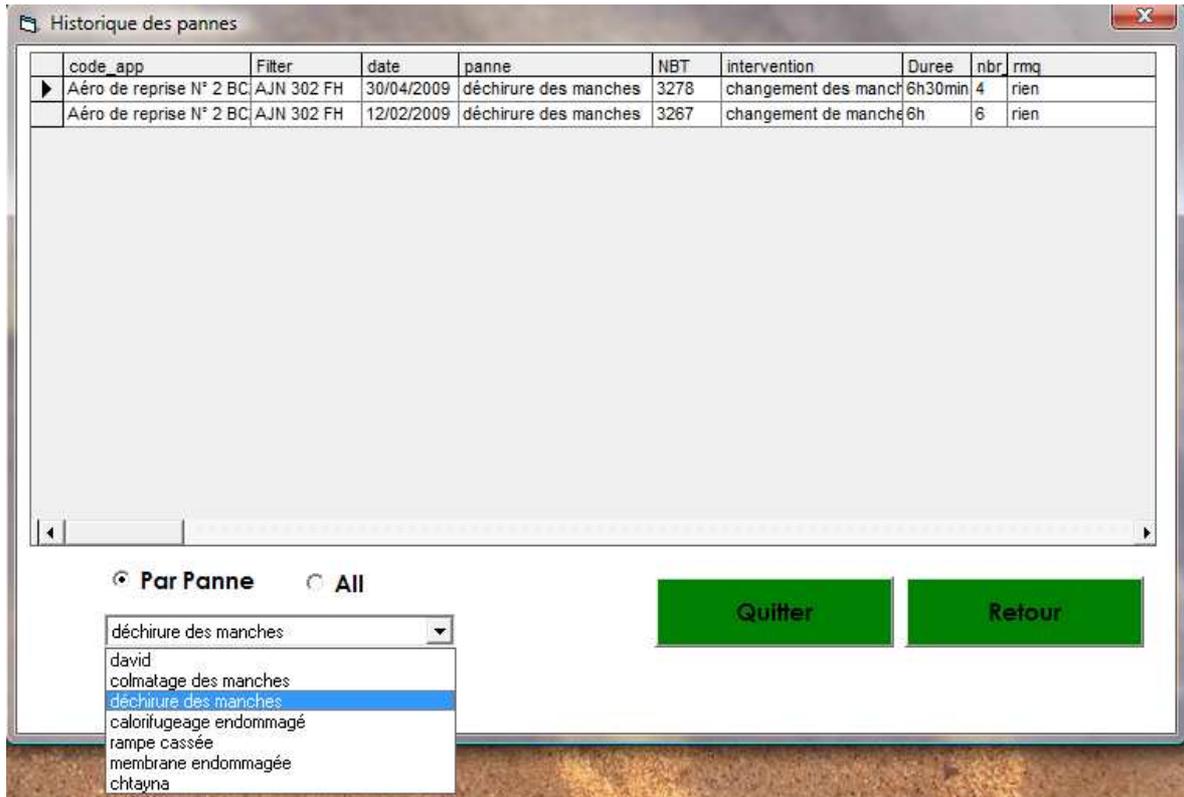
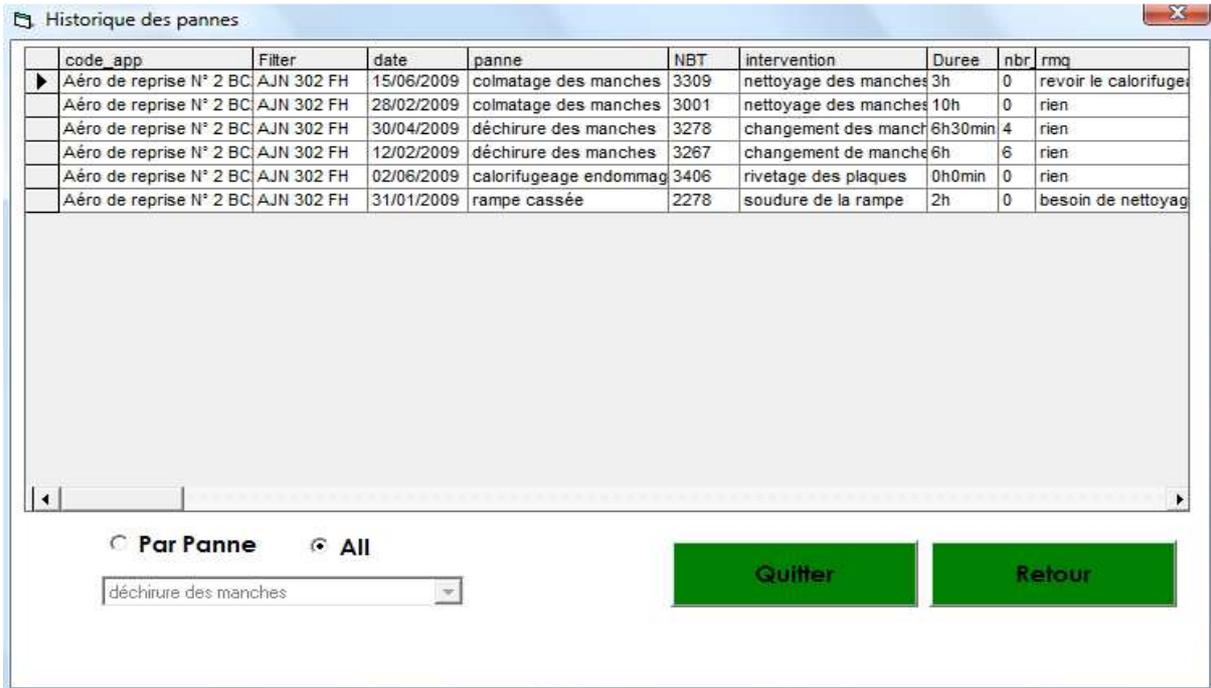


Fig.IV.8 : menu historique

Conclusion

Ce nouveau logiciel que l'on a créé va permettre d'archiver et d'enregistrer les détails relatifs aux pannes, comme les durées d'arrêts, les pièces de rechange, les interventions spécifiques à exécuter... En perspective on peut proposer de faire une extension de GEMAFIL pour lui permettre de calculer la fiabilité des machines, leurs indices de disponibilités, la redondance de leurs pannes, et ce dans le but d'adopter un comportement spécifique avec chaque machine pour pouvoir remédier de façon efficace à leurs défaillances et défauts de fonctionnement.

Toujours dans le but d'optimiser la manière dont est exécutée la maintenance des filtres de dépoussiérage, nous allons dans le chapitre suivant étudier l'éventualité d'engager une société spécialisée dans la maintenance, pour passer à la sous-traitance au lieu de la maintenance en interne.

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'aspect technique ainsi qu'économique de la maintenance des installations de dépoussiérage. En premier temps, nous allons définir quelques points clefs de la fonction maintenance, expliciter quelques points concernant les coûts ainsi que les enjeux de l'externalisation de la dite maintenance que ce soit pour Lafarge Meknès ou bien pour le sous-traitant. En second lieu, nous allons déterminer combien ça nous coûte la maintenance(en interne). Ensuite, nous allons élaborer un cahier de charges que l'on va proposer aux postulants dans le cadre d'un appel d'offre, et puis, nous allons choisir le meilleure rapport prix /qualité des prestations.

1 Définitions

1.1 La maintenance

La maintenance, selon AFNOR NFX 60-010, est l'ensemble des actions permettant de maintenir ou rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Selon encore AFNOR X60-000, bien maintenir est assurer ces opérations au coût global optimal.

1.2 Objectifs de la maintenance

Maintenir en bon état et améliorer une installation, la maintenance doit réaliser ses objectifs à travers son organisation, sa gestion et ses interventions. Les objectifs visés sont essentiellement :

- La disponibilité ;
- L'économie ;
- La qualité ;
- La capacité ;
- La durabilité ;
- La sécurité ;
- La productivité ;
- La protection de l'environnement.

1.3 Coûts de la maintenance

On peut distinguer deux types de coûts de maintenance : directs ou indirects[5].

- **Les coûts directs** sont représentés principalement par le coût horaire des interventions ainsi que le coût des pièces de rechange.

- **Les coûts indirects** de la maintenance peuvent être la surconsommation d'énergie, machines excédentaires, coût de possession de pièces de rechange en stock, produits de traitement, sous cadence et manque à gagner, heures supplémentaires, pertes matières premières, mauvaise image de marque, pénalités contractuelles...

Les coûts indirects sont engendrés indirectement par manque de maintenance ou par mauvaise pratique. Il est nécessaire de pouvoir déterminer ces coûts car il s'agit d'un des problèmes majeurs de la maintenance. Les responsables ont tendance à ne voir que les coûts directs qui ne représentent que la partie visible de l'iceberg (Fig. V.1) [6] :

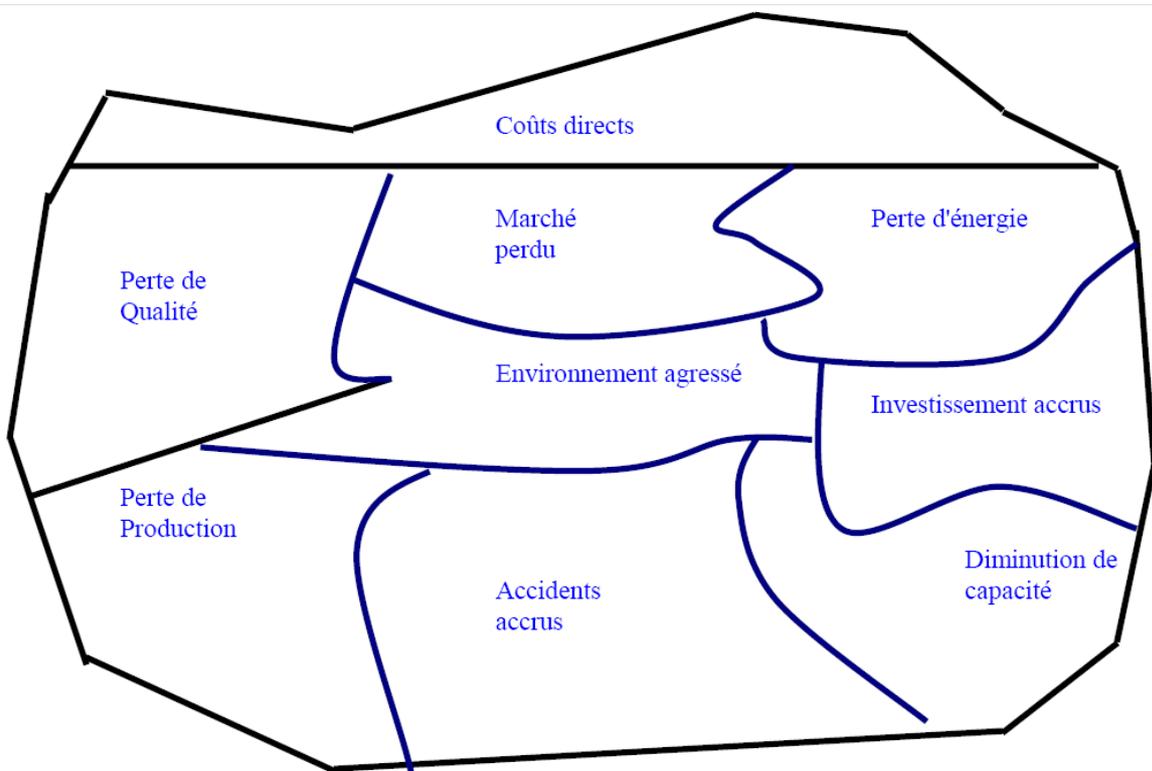


Fig. V.1 : Iceberg des dépenses de la maintenance

1.4 Enjeux technico-économiques de l'externalisation de la maintenance

L'externalisation de la maintenance a différentes avantages que ce soit pour le donneur d'ordre (LAFARGE) ou pour le sous-traitant :

- 1- Pour le donneur d'ordre :
 - Réduction des coûts directs :
 - Interventions "juste à temps" ;
 - Méthodologies et réactivité adaptées ;
 - Productivité des moyens mis en œuvre ;

- « Juste coût » (cadre professionnel et flexible).
 - Réduction des coûts indirects :
 - Sûreté de fonctionnement ;
 - Disponibilité du patrimoine ;
 - Qualité des services procurés ;
 - Sécurité (Biens, personnes, environnement).
 - Réduction des coûts fixes :
 - Structurels : Peu flexibles - Incompressibles (sinon drastiques et douloureux) ;
 - Modulation des coûts variables ;
 - Flexibilité des moyens (sans précarité) ;
 - Maintenance « juste à temps » ;
 - Gisements d'économies (conjoncturelles).
- 2- Pour le sous-traitant :
- Les performances quantitatives :
 - La disponibilité du bien confié ;
 - La productivité des moyens mis en œuvre.
 - Les performances qualitatives :
 - La sécurité des personnes et la protection de l'environnement ;
 - La qualité des services procurés (Gestion des anomalies - Plans de progrès) [7].

2 Chiffrage de la maintenance

2.1 Coûts directs

2.1.1 Coût de la main d'œuvre

Pour chiffrer en dirhams ce que nous coûte la maintenance, comme coûts directs des systèmes de dépoussiérage pendant une année, on doit déterminer la charge horaire que cela représente ainsi que le coût des pièces de rechange.

Donc pour déterminer la charge horaire, on a chronométré les ouvriers entrain de changer des manches, puisque ce dernier représente 95% des opérations d'entretien que l'on exécute sur les filtres. Ensuite, on a cherché à déterminer le nombre de fois où l'on a changé des manches dans les filtres de toute l'usine, on a multiplié les deux et on a eu le temps total d'intervention sur les filtres.

$$T_{\text{total}} = N_{\text{manches}} \times (T_{\text{chgmt}} + T_{\text{cons/décons}} + T_{\text{rem}})$$

Avec :

- T_{chgmt} : temps de changement de la manche ;
- $T_{\text{cons/décons}}$: temps de consignation et déconsignation ;
- T_{rem} : temps de remise en service.

Pour déterminer le nombre de manches que l'on a changé pendant toute une année, et puisque on ne pouvait pas avoir cette information sur MAXIMO, on a eu l'idée de consulter le nombre de sorties des manches du magasin pendant deux années (voir tableau V.1) , on a ajouté les manches qui ont été installées ou changées et qui ne sont pas passées nécessairement par le magasin -notamment deux gros investissement qui ont concerné deux filtres, celui de l'amont du four 1 ainsi que le filtre hybride en amont du four 2- pour obtenir le nombre total de manches changées pendant ces deux années, puis on divise par 2 pour obtenir le nombre final de manches à multiplier par le temps d'intervention pour obtenir le temps total d'intervention sur les filtre.

$$N_{\text{manches}} = N_{\text{mag}} + N_{\text{F1}} + N_{\text{F2}}$$

Description.	Qualité	Nombre.	Prix
Média filtrante Ø160x2250	NX/NX 551	110	233,00
Média filtrante Ø160x3375	PE/PE 554 CS 17 MIRROR	337	91,00
Média filtrante Ø160x3600	PEAC 601/75 AS	223	241,00
Média filtrante Ø145x5000	PE/PE 501 150°C	834	170,00
Média filtrante Ø160x3940	PEV 560	277	111,00
Média filtrante Ø160x1125	PEV 610	38	128,00
Média filtrante Ø160x2250	PE/PE 554 CS 17 MIRROR	299	70,00
Média filtrante Ø160x2250	PEV 610 MF Antistatique	121	200,00
Média filtrante Ø160x1125	PE/PE 501 K 14 AS	28	165,00
Média filtrante Ø127x2500	PE/PE 501 K 14 AS Avc SNAP	0	***
Média filtrante Ø160x4500	PI/RA V 600	360	1072
Média filtrante Ø150x2520	7460 AD	46	***
Média filtrante Ø122x3000	PE/PE 554 CS MIRROR	0	115
Média filtrante Ø450x1650	NOMEX NXV 560	29	476
Média filtrante Ø127x2500	PE/PE 550 Avc fond renforcé	40	***

Média filtrante Ø160x3375	NOMEX NXV 560	***	592
Média filtrante Ø160x7000		***	2200

Tableau V.1 : liste des sorties de magasin des médias filtrants

Le nombre total de manches changées est 2754, on y ajoute les 2430 (filtre amont F1) et 1092 (filtre hybride) des investissements et on obtient un nombre total de manches changées pendant deux années de 6276. On estime donc le nombre de manches changées par années à 3150 manches.

Pendant l'intervention que nous avons chronométré, il y avait 4 intervenants, un Chef d'Equipe, un Mécanicien et deux hommes de chez un Sous-traitant (SPOTT). Les opérations de changement de 10 manches à duré plus de 4h15 minutes, donc on estime le changement d'une manche à peu près 26 min. On estime aussi le temps de consignation déconsignation à 20min et le nombre annuel de fois que cela se fait(le nombre de pannes) à 50 fois. Et enfin, on estime le temps de remise en marche à 15 minutes.

Donc comme estimation du coût de la main d'œuvre on a :

$$C_{hor} = 0,5S_{CE} + S_M + 2S_{ST}$$

- S_{CE} : Salaire du chef d'équipe ;
- S_M : Salaire du mécanicien ;
- S_{ST} : Salaire du sous-traitant.

Le salaire d'un chef d'équipe est estimé à 65DH/h, celui d'un mécanicien est estimé à 45DH/h, et celui des sous-traitants est estimé à 15DH/h. Donc le coût horaire de changement d'une manche est de 107,5DH/h.

Ce qui donne un coût direct total des interventions sur les manches de :

$$\begin{aligned} C_{tot} &= C_{hor} \times T_{tot} + C_{2ouv} \\ &= 107,5DH/h \times [(26min \times 3150) + (30min \times 50) + (15min \times 50)] \\ &= \underline{\underline{150768,75DH/an}} \end{aligned}$$

Il n'y a pas que les manches que l'on change dans les filtres, il y a aussi les vannes, les purges... mais cela est plutôt négligeable par rapport au changement des manches, donc on va ajouter au chiffre retrouvé précédemment 20% pour comptabiliser la main d'œuvre qui se charge de ce genre d'intervention, d'autant plus que l'on n'a pas de chiffre exact. Et donc le coût total de la main d'œuvre sera : $C_{tot} = 181000$ DH/an.

Il existe aussi sur l'usine deux ouvriers de chez le sous-traitant SPOTT et qui sont dédiés totalement aux installations de dépoussiérage, donc ils travaillent 48 semaines par an, 5 jours par semaine et 8 heures par jour, leur salaire est estimé à 57600DH/an.

2.1.2 Coût des pièces de rechange

Le coût de toutes les manches consommées durant un an est de $C_{mch} = 3142999\text{DH/an}$.
Le coût des membranes et des vannes est estimé à $C_{mebr/van} = 1435780\text{DH/an}$.

2.2 Coûts indirects

Les coûts indirects représentent tous les coûts que l'entreprise subit à cause de la maintenance ou lors de la durée d'exécution de celle-ci, et que l'on ne peut pas voir d'une façon pertinente.

Dans une cimenterie, il existe plusieurs paramètres qui peuvent entrer dans le compte des coûts indirects de la maintenance, et que l'on ne peut pas chiffrer, mais qu'on peut tout de même estimer quelques uns de ces paramètres et donner un chiffre approximatif que l'on peut arrondir à la hausse à la fin.

Par exemple, on peut estimer le manque à gagner lorsqu'on a une panne, on peut aussi estimer les temps de travail des différents intervenants dans le processus de gestion de maintenance des installations, mais par contre, on ne peut pas chiffrer nos pertes en énergie pour reprendre la cadence normale de production, ou bien les coûts des différentes formes de communication qui peuvent avoir entre les différents intervenants, le degré d'usure des plaques réfractaires qu'il y a dans les fours et qui s'usent par fatigue thermique à chaque fois que le four change de température... etc. C'est pourquoi on va calculer quelques paramètres et on va juste estimer les autres.

2.2.1 Débit de clinker qui manque à gagner

Durant une année, il y a en moyenne une bonne douzaine d'arrêts des fours sur panne, et dedans on peut trouver deux ou trois pannes causées par les défaillances des installations de dépoussiérage, c'est surtout quand il s'agit des deux filtres amont et aval de chaque four. En principe ce genre de pannes entraîne un arrêt de four à 15 heures par an pour les deux fours.

Le premier four produit une moyenne de 140 t/h de clinker, et le second four en produit 90 t/h, donc on va estimer un débit moyen de 115 t/h qui accuse une perte moyenne de 30%, ce qui donne un débit moyen réel de ciment de 80,5 t/h. Le manque à gagner en terme de débit de clinker est de :

$$M_{KK} = T_{art} \times Q_{KK}$$
$$M_{KK} = 15h \times 80,5t/h$$

Tous calculs faits, on trouve le manque à gagner en terme de débit de clinker de : $M_{KK} = 1207,5t$, et sachant que LAFARGE vend une tonne de ciment ayant coûté 500dh à 1000dh, on peut estimer le manque à gagner pour une année à environ $C_{mq} = 603750DH/an$.

2.2.2 Poussières émises

Les filtres de dépoussiérage tombent en panne en moyenne 50 fois par an. tomber en panne le moment où ces filtres se mettent à émettre de la poussière. Cette émission de poussière peut être quantifiée par le taux d'émission. Ce dernier, lorsqu'il est au dessous de $120g/m^3$ il n'est pas visible par l'œil nu, mais lorsqu'il dépassé cette limite, il commence à être visible et à nuire à l'environnement. Cette émission est estimée, selon le service environnement, pendant les pannes à une moyenne de $250g/m^3$. En multipliant le débit moyen de tous les filtres par ce taux et puis par le temps de panne annuel des filtres, on trouve que l'on perd 20t de matière sous forme de poussière. Une quantité que l'on peut chiffrer de la même façon à environ $C_{psr} = 10000DH/an$.

2.2.3 Coûts indirects totaux

On peut enfin estimer l'ensemble des coûts indirects en sommant l'ensemble des chiffres retrouvés précédemment, puis en multipliant le tout par un coefficient de sécurité de 1,50 pour inclure les autres charges indirectes que l'on ne pouvaient pas calculer.

$$C_{ind} = (\sum C_i) \times 1,25$$
$$C_{ind} = (C_{mq} + C_{psr}) \times 1,25$$
$$C_{ind} = 890000DH/an.$$

2.2.4 Coût total de la maintenance

D'après nos calculs des coûts directs et indirects hors pièces de rechange, on peut estimer le coût total de la maintenance des installations de dépoussiérage à **1005708,5DH/an.**

3 Cahier de charges pour les sous-traitants de la maintenance

3.1 Introduction

Dans cette partie, on va élaborer le cahier de charge technico-juridique que l'on va imposer à nos sous-traitants. Pour ceci, il va falloir préciser le cadre et les limites des prestations, l'ensemble du parc machine sur qui fera objet du contrat, ensuite on va proposer les gammes et fréquences de visites préventives et audits des installations de dépoussiérage.

Pour pouvoir élaborer le cahier de charges, on se devait de reformuler les gammes de visites et d'intervention sur les filtres, et ce en consultant les dossiers techniques des filtres, et organisant plusieurs réunions avec les différents intervenants dans le processus de maintenance de ces installations. Puis, on a fait une réunion avec les responsables des services : environnement, sécurité, ressources humaines et achat, pour pouvoir formuler nos exigences en matière de respect des règles de sécurité, de l'environnement ainsi que nos exigences en terme de gestion des ressources humaines des sous-traitants, de matériels et locaux...etc.

En définitive, nous avons pu élaborer le cahier de charges que l'on va donner aux sous-traitants postulants.

3.2 Cahier de charges

3.2.1 Objet du contrat

Le présent document a pour objectif de fixer le cadre dans lequel sera exécutée la maintenance des installations de dépoussiérage de l'usine LAFARGE-Ciments Usine de Meknès.

3.2.2 Appareils concernés

Les appareils qui font objet de notre contrat sont énumérés dans la liste : « Liste des filtres », et par installation de dépoussiérage il faut entendre : les filtres, les ventilateurs, les tuyauteries ainsi que les circuits de récupération de matière.

En effet, LAFARGE n'effectuera aucun changement majeur ni modification importante sans avoir informé et consulté le sous-traitant.

3.2.3 Nature des prestations requises

Le sous-traitant aura à accomplir toute tâche d'entretien préventif et curatif selon les règles ci-dessous :

a) **Entretien préventif**

Le sous-traitant devra s'occuper des tâches de contrôle, d'entretien et de mesures sur les filtres, ventilateurs, tuyauteries et circuits de récupération, par ailleurs, LAFARGE se chargera de lui remettre les programmes d'arrêt hebdomadaires, mensuels ou trimestriels, sur la base de ce programme. Le sous-traitant établira et remettra au chef du service d'entretien mécanique ou son représentant ses prévisions d'immobilisation des installations pour les travaux importants.

Le sous-traitant effectuera périodiquement une visite de contrôle qui comprend :

- La vérification visuelle de la captation et du refoulement du dépoussiéreur duquel ne doit sortir aucun rejet visible à l'œil nu et le contrôle du déroulement correct et effectif du cycle de décolmatage. En cas de rejet à l'atmosphère, le personnel du sous-traitant agira dans un délai maximum de 4 heures soit pour isoler ou remplacer les parties incriminées, soit auprès de l'interlocuteur de l'usine pour prendre les décisions qui s'imposent d'après les disponibilités des installations et des prévisions d'arrêts.
- La liste des équipements vérifiés sera communiquée par écrits au chef d'entretien mécanique.
- Les fréquences et les gammes de visites et des interventions sont détaillées sur l'annexe.

b) **Entretien curatif**

L'entretien curatif a pour objectif la remise en état consécutive ou non à des détériorations accidentelles ou imprévisibles. A cet effet, le responsable du sous-traitant signalera au responsable de LAFARGE les incidents constatés et établira avec lui la liste des besoins en matière consommable et pièces de rechange nécessaire à la réalisation des travaux ainsi que le planning de réalisation des travaux de réparation. Le responsable de Lafarge Meknès pour le suivi du contrat à son tour signalera au sous-traitant tout incident constaté et lui demandera de faire le nécessaire.

En cas d'incident ou de dérive sur un matériel couvert par le présent contrat, le responsable du sous-traitant remettra au chef d'entretien, un rapport indiquant l'origine de l'incident. En cas de panne, le personnel du sous-traitant assurera le dépannage. Pour les interventions d'urgence, le sous-traitant devra garantir un délai maximum de huit heures pour les filtres normaux et de quatre heures pour les filtres process, cette intervention doit avoir lieu suite à un constat du sous-traitant ou à un appel de l'usine.

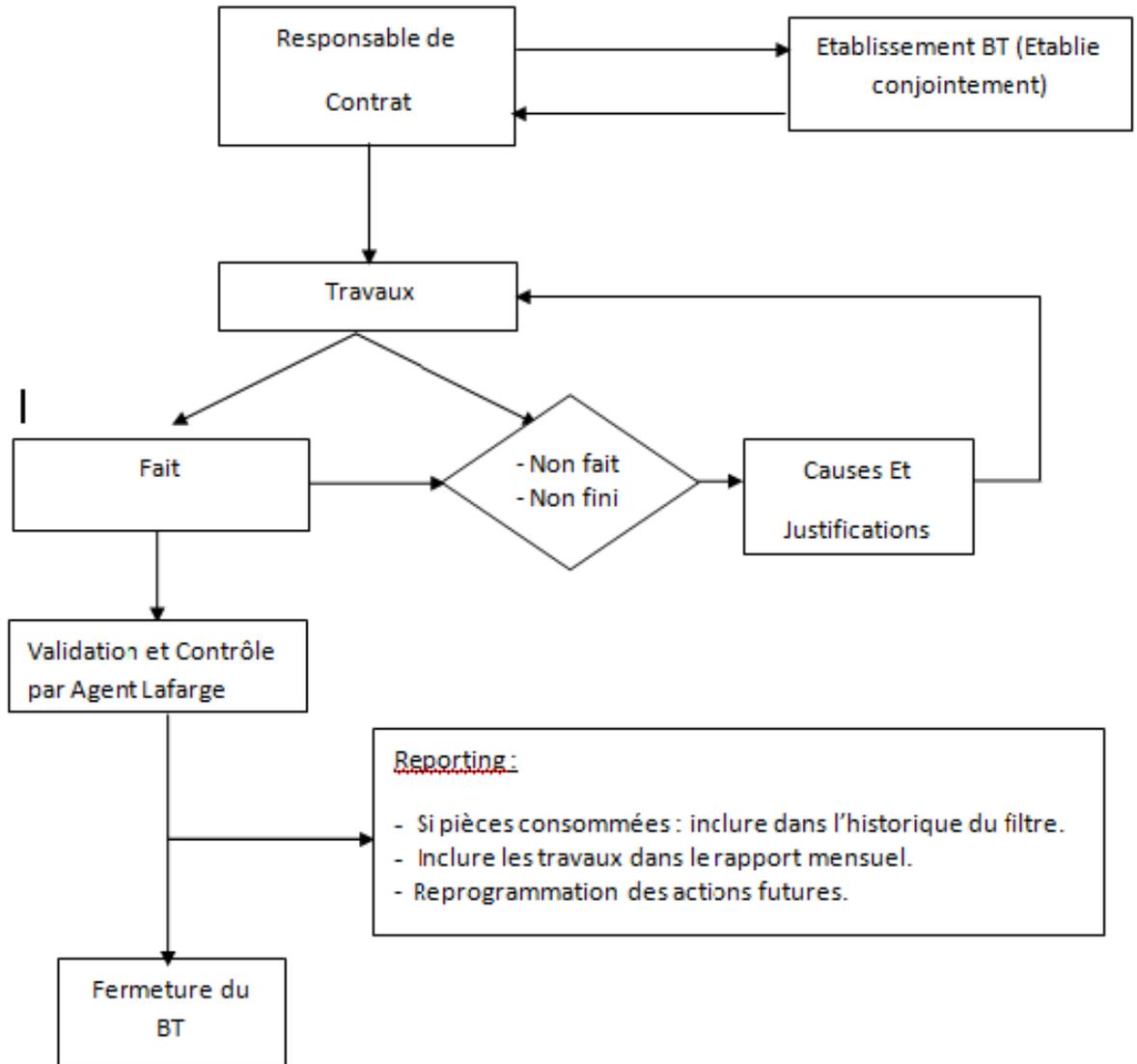
i. **Remplacement des Manches**

Tout changement de manches filtrantes, que ce soit pendant un arrêt programmé ou non, sera effectué par le personnel qualifié du sous-traitant. Cette prestation est entièrement comprise dans le prix forfaitaire annuel du présent contrat.

ii. **Nettoyage**

Tout produit ou déchets issus des opérations de nettoyage devras être placés directement dans les bennes à ordures, et les opérations de nettoyage se feront de préférence par aspiration.

iii. **Mode opératoire du bon travail**



iv. Pièces de rechange

Lafarge-Ciments se chargera de l'approvisionnement et de la tenue en stocks des pièces de rechange ne seront facturées à Lafarge Meknès qu'après leurs utilisation. la liste non exhaustive des pièces de rechange est la suivante:

- Electrovanes;
- Vannes à membranes;
- Séquenceurs;
- Les membranes;
- Les bobines d'excitation;
- Tube rilsan
- Les joints d'étanchéité;
- Les kits de rechange vanne (ressort, membrane secondaire);

- Les durites de liaison entre rampe de soufflage et vanne.

v. **Analyse des manches**

Le sous-traitant, en collaboration avec sa maison mère, offrira par année 05 analyse gratuites de manches défectueuse à la demande de Lafarge Meknès, pour déterminer les causes d'usure prématurée éventuellement relevée.

3.2.4 Limites des prestations

On exclut du cadre forfaitaire du contrat les pièces et la main d'œuvre concernant:

- Les améliorations ou transformations d'installations demandées par Lafarge-Meknès, ou suggérés par le sous-traitant et approuvés par Lafarge-Meknès.
- La fourniture des cages ou volutes des ventilateurs et leurs châssis support.
- Le matériel et les installations électrique, armoires ou coffrets électrique, contacteurs, sectionneurs, asservissement, câblage, circuits imprimés, automates, séquenceurs ou programmeurs de cycle de décolmatage, qu'ils soient électrique ou électronique...etc.
- La poudre fluorescente pour chaque détection de fuite à réaliser (la lampe et les tubes noir de rechange sont à la charge du sous-traitant).
- Les engins de manutention tels que grues et chariots élévateurs.
- Les moteurs, moto réducteurs, moto-vibreurs, électro-aimants, vérin électriques, etc..., et en général, toute fourniture ou travaux non spécifiés.

Les consommables de travail suivants:

- o baguette
- o disques à meuler et à tronçonner
- o bouteilles chalumeaux (oxygène et acétylène).
- o silicone transparente standard,
- o silicone haute température pour les filtres process,
- o Les tubes de rechanges pour lampe lumière noire,
- o la boulonnerie,

3.2.5 Communication

Le responsable sous-traitant du contrat sera en lien direct et permanent avec le contre maitre de Lafarge pour la programmation et l'établissement des BT (bon de travail) sous GMAO.

Par ailleurs les comptes-rendus et les tableaux de mesures seront communiqués en temps réel aux responsable entretien mécanique de Lafarge (écrits et par mail),il sera aussi amené à établir des rapports d'état des lieux d'une façon périodique(trimestrielle).

3.2.6 Compte rendu

- **Filtres process**

Compte rendu d'expertise mensuelle en fonctionnement des dépoussieurs et de leurs réseaux, validé par Lafarge. Ce document fera apparaître les mesures de débit, de pression, de perte de charge, de temps de cycle de décolmatage etc...compte rendu de visite trimestrielle à l'arrêt suivant le plan de charge des équipements communiqué par Lafarge(dans la mesure où les appareils pourront-êtré effectivement visités à l'arrêt pendant l'horaire de travail normal) compte rendu annuel de visite et de mesures

- **Autre filtres**

Compte rendu de visite trimestrielle en marche des équipements et de leurs réseaux compte rendu annuel de mesures.

3.2.7 Moyens humains, Matériels et logistique

3.2.7.1 Moyens humains

a) Présence

Le sous-traitant va devoir assurer la présence de 5 personnes au moins dans l'enceinte de l'usine de Meknès et ce d'une façon permanente selon le schéma suivant:

Permanents:

1 Responsable, interlocuteur unique de Lafarge Meknès qui se chargera de :

- Suivi régulier des installations.
- Prises de contact afin de répondre aux éventuels incidents de la nuit ou du week-end.
- Synchronisations et de contrôle des équipes de travail sur le site.
- Les mesures.
- Les visites préventives suivant le plan préétabli.
- L'établissement des rapports et des différents documents
- Chacune de ses absences sera communiquer avec le nom de son remplaçant, il sera doté d'un téléphone portable.

4 Personnes pour l'exécution de toutes les taches relative au présent contrat. Ces personnes devront être formées par le sous-traitant et qualifiées pour toutes les interventions dont elles auront la charge.

Ponctuels:

Le sous traitant s'engage à renforcer son équipe chaque fois que cela s'avère nécessaire pour accomplir dans les règles de l'art les engagements liés au présent contrat notamment pour la réalisation des travaux durant les arrêts programmés Des Fours.

Il confiera les travaux spéciaux (chaudronnerie, tôlerie, intervention électrique,...etc.) à des spécialistes qualifiés.

L'horaire de travail sera celui fixé par la direction de l'usine de Meknès.

b) Conditions et compétences

Le Personnel recruté par les soins du sous-traitant pour cette prestation, devra répondre de toutes les garanties de compétence, de rigueur et de moralité nécessaire. Il appartiendra au sous-traitant de le former au travail à accomplir et aux règles et consignes propre à notre établissement afin que sa tâche soit accomplie dans les règles de l'art.

En outre, il devra porter un uniforme à l'enseigne du sous-traitant et un badge ainsi que les équipements individuels de protection. Aussi l'ensemble du personnel du sous-traitant devra se plier aux règles de sécurité en vigueur dans l'usine, explicitées dans le paragraphe 7.

Par ailleurs, dans le cas où un membre du personnel sous-traitant ne répondait pas aux exigences citées ci-dessous, purement et simplement renvoyé par Lafarge Meknès.

- **Visite médicale**

Le personnel du sous-traitant devra subir une visite médicale biannuelle. Cette visite est à la charge du sous-traitant. De la même manière une radio pulmonaire sera effectuée chaque 6 mois.

Le sous-traitant remettra à l'usine de Meknès, les justificatifs correspondants à cette visite et à la radio pulmonaire de chaque intervenant.

- **Transport, Restauration, Tenue de travail et sécurité**

Le sous-traitant assurera à ses frais le transport de son personnel jusqu'au lieu de travail ainsi que les charges de restauration et lui fournira l'ensemble des tenues de travail à l'enseigne du sous-traitant ainsi que les équipements de sécurité requis, dont:

- 2 tenues de travail par an portant le logo et nom de la société sous-traitante.
- Matériel de protection individuelle et de sécurité qui seront adaptés au poste occupé.

Le personnel du sous-traitant devra obligatoirement porter ces équipements ainsi que les tenues de travail.

3.2.7.2 Moyens Matériels:

L'équipe du sous-traitant devra déposer 1 à 2 véhicules pour répondre aux besoins ou urgences, dont un en permanence sur site de Meknès, hormis l'outillage spécifique qu'a

chaque intervenant, le sous-traitant devra fournir tout le matériel ci-dessous (liste non exhaustive) afin d'effectuer les prestations qui lui seront confiées:

- Un matériel de mesure multifonction ;
- Trois palans à différents tonnages ;
- Deux postes de soudage ;
- Trois échelles à différents hauteurs ;
- Trois caisses à outils ;
- Arrache poulie ;
- Trois meules ;
- Deux perceuses portatives.

3.2.8 Sécurité

Lafarge s'engage à mettre à la disposition de tout intervenant au sein de l'usine un environnement de travail sain, en toute sécurité. Lafarge s'engage également à conduire ses activités en toute sécurité. La santé et la sécurité de travail sont des valeurs fondamentales qui doivent être prises en compte dans tous les aspects de nos activités à tous les échelons du groupe.

Toute personne qui travaille pour Lafarge est en droit de disposer d'un environnement de travail sain mais en retour nous attendons de chacun qu'il contribue par un comportement responsable, à cet environnement. Chacun doit également démontrer par un engagement actif et une responsabilité visible, que la santé et la sécurité sont des valeurs fondamentales. En outre toute personne qui intègre le personnel intervenant dans l'usine va devoir suivre une formation spéciale de sécurité explicitant toutes les règles en vigueur à l'usine de Meknès.

3.2.9 Environnement

Le personnel engagé pour la réalisation de cette prestation doit se conformer strictement aux règles et procédures de l'usine en matière de respect de l'environnement:

- Pendant les activités sur le site de l'usine Lafarge et dans les limites de ce contrat, le sous-traitant sera responsable et devra respecter et veiller à ce que tout son personnel respecte notamment toutes les mesures pour sauvegarder l'environnement et préserver la propreté de l'usine.
- Les procédures environnement de l'usine peuvent être consultées par le sous-traitant à tout moment sur sa demande.

- Un exemplaire à jour concernant l'exécution de ce contrat, est remis à la signature du contrat et préalablement à son intervention. Toute modification de ces procédures durant l'exécution du contrat fera l'objet d'une information immédiate.
- Pendant les activités sur le site de l'usine Lafarge et dans les limites de ce contrat, le sous-traitant sera responsable de l'élimination des déchets générés par son activité. Dans le cadre, il devra les éliminer soit en appliquant la procédure interne de gestion des déchets de la cimenterie et de la carrière, soit en effectuant les démarches nécessaires auprès d'une société locale de transport pour l'enlèvement des bennes, si Lafarge le juge approprié et l'autorise.
- le sous-traitant devra faire approuver par Lafarge Meknès, la zone choisie pour installer les bennes.
- Le sous-traitant nettoiera tous les jours les zones de travaux (dans la limite de ce contrat) pour veiller au maintien de la propreté du site de l'usine Lafarge.
- Si une infraction à ces règles est constatée par le responsable environnement ou un agent d'encadrement, ils en informent le directeur d'établissement (ou son remplaçant) qui peut décider de la suspension des prestations en attendant qu'il soit remédié au problème constaté. Si le problème n'est pas traité dans le délai fixé, Lafarge Meknès aura le droit de suspendre l'exécution du contrat sans pénalité et de faire poursuivre son exécution par une autre entreprise. Dans ce cas le différentiel éventuel de cout sera mis à la charge du sous-traitant défaillant.
- Le sous-traitant a la responsabilité de former son personnel intervenant à l'usine Lafarge aux procédures environnement remises par Lafarge Meknes.il accepte également que ceux-ci soient associés aux actions de sensibilisation et de formation à l'environnement organisées par Lafarge pour son propre personnel.
- Le sous-traitant doit désigner un agent chargé de la coordination en matière d'environnement entre son entreprise et Lafarge. Avant chaque intervention sur le site de l'usine Lafarge, cet agent remplira le "Plan de prévention" avec l'ingénieur Fabrication de LAFARGE afin de préciser les précautions particulières à respecter.

4 Choix des sous-traitant

Après avoir organisé deux réunions avec les gens du secteur utilisé et bureau des méthodes, nous avons pu sortir une version finale du cahier des charges à proposer aux sous-traitants. Les modifications étaient portées principalement sur la partie technique du cahier,

mais surtout sur la partie responsabilités vis-à-vis de Lafarge, concernant notamment la main d'œuvre et les moyens matériels.

Cette version finale en main, nous avons donc contacté le service achat, responsable de ce genre d'opérations, pour qu'il puisse lancer la procédure d'appel d'offre. La procédure étant suivie et aboutie, on a reçu une réponse de chez quatre sociétés spécialisées dans la maintenance industrielle, et spécialement celle des installations de dépoussiérage.

Après plusieurs négociations entretenues avec les sociétés concernées, et quelques visites de leurs parts à nos installations, nous avons reçu leurs devis et prix forfaitaires. Nous pouvions alors faire une étude comparative entre les différentes sociétés postulantes ainsi que la maintenance en interne de nos installations. Nous allons donc par la suite faire une analyse critique pour l'ensemble des cas de figures pour pouvoir à la fin choisir la solution la plus convenable. Les devis et prix forfaitaires étaient comme suit:

				GERISCOM
Services proposés	<ul style="list-style-type: none"> • Remise en marche des filtres des ateliers liaisons manèges. • Installation des filtres du Hall. • 3 Expertises gratuites assurées par des spécialistes maison 	<ul style="list-style-type: none"> • Remise en marche des filtres des ateliers liaisons manèges. • Installation des filtres du Hall. • 06 Analyses de manches gratuites. • 2 Expertises, et une formation pour le personnel de l'usine. 	<ul style="list-style-type: none"> • Remise en marche des filtres de l'atelier liaison manège. • Réduction de 10% sur les prix des manches pendant 3 ans. • 10 Analyses de manches gratuites. 	<ul style="list-style-type: none"> • Remise en marche des filtres de l'atelier liaison manège. • Réduction de 10% sur les prix des manches pendant 3 ans. • 10 Analyses de manches gratuites.

4.1 Analyse des offres

4.1.1 Offre A, INTENSIV

La société INTENSIV est une grande entreprise spécialisée dans la conception et la maintenance des installations de dépoussiérages, d'ailleurs la plupart de nos filtres sont de

marque INTENSIV. Ils proposent la remise en marche des filtres de l'atelier liaison manège en prenant en charge la main d'œuvre qui effectuera les diagnostics, analyses et travaux de maintenance, d'installer les nouveaux filtres du hall que l'on a commandé de chez eux, ainsi que trois expertises gratuites assurés par leurs spécialistes.

Conclusion: il s'agit d'une offre intéressante, de leur part, mais le prix forfaitaires est trop élevé par rapport aux autres postulants pour les services proposés.

4.1.2 Offre B, MORTELECQUE

La société MORTELECQUE nous propose de prendre en charge la remise en marche des filtres de l'atelier liaison manège question main d'œuvre et pièces de rechange avec un plafond de 10 000 DH, de prendre en charge aussi la main d'œuvre lors de l'installation des filtres du hall, de nous faire 6 analyse des manches au lieu des 5 demandées dans le cahier des charges, ainsi que deux expertises sur site et une formation sur les nouvelles technologie de dépoussiérage pour notre personnel assurées par leurs spécialistes.

Conclusion: il s'agit d'une offre assez tentante, car ce qu'ils proposent comme services est très bénéfique par rapport au prix forfaitaire demandé, d'autant plus que l'on a eu une expérience avec Mortelecque au niveau de Lafarge Bouskoura-casablanca, et ce sont leur qualité de service ainsi que l'état de fonctionnement de nos installations après qu'ils les ont pris en charge qui nous ont incités à envisager de sous-traiter la maintenance à Meknès.

4.1.3 Offre C, GORE

La compagnie GORE nous propose de remettre en marche les filtres de l'atelier liaison manège en prenant toutes les charges à son compte, de nous faire une réduction de 10% sur nos achat de manches GORE pendant 3ans, ainsi que 10 analyses de manches gratuites au lieu de 5 demandées.

Conclusion: les services proposés ne sont pas aussi intéressants que ceux proposés dans les deux premières offres, malgré le fait que GORE est l'un de nos principaux fournisseurs de manches. Leur proposition de nous faire 10 analyses n'est pas très tentantes, car déjà ils nous proposent dans leur contrat de vente de manches 5 analyses, avec les 5 demandées, c'est largement suffisant. Donc malgré le fait que le prix forfaitaire est moins cher que celui de INTENSIV et MORTELECQUE cette offre demeure très faible.

4.1.4 Offre D, GERISCOM

La compagnie GERISCON nous propose en plus de la tenu des promesses du cahier des charges, nue réduction de 10% sur les prix des manches pendant 3ans ,ainsi que

la prise en charge complète de l'installation des nouveaux filtres à installer au niveau du hall pour un prix de 1 050 000 DH/an.

Conclusion: cette offre ne présente pas beaucoup de points forts, vu la position de la société en tant que nouveau venu dans le marché locale, donc on ne connaît pas leur historique ou bien la qualité de leurs services additionnels proposés sont plutôt faible par rapport aux autres postulants, et ce malgré leur prix forfaitaire qui est plus faible que tous les autres.

Une réunion s'est tenue le Jeudi 17 Mai 2010 pour étudier les différentes possibilités et combinaisons possibles entre maintenance en interne ou bien sous-traitance, et ils en sont sortis avec la conclusion suivante:

→ Vu les services proposés par les postulants ainsi que les prix forfaitaires proposés, nous avons opté pour un contrat de maintenance s'étalant sur une année, renouvelable. Notre choix s'est porté sur la société MORTELEQUE, vu les services additionnels qu'ils proposent, leur position de leader sur le marché ainsi que leur historique avec Lafarge-Ciments, notamment à l'usine de Bouskoura-Casablanca vu la qualité de leurs services.

Conclusion et Perspectives

Au terme de ce projet de fin d'études, une brève rétrospective permet de dresser le bilan du travail effectué avec ses difficultés, ses contraintes, mais aussi et surtout le supplément de formation si riche dont j'ai eu la chance de bénéficier.

En effet, le projet constitue l'agrégation de trois travaux complémentaires qui visaient tous l'optimisation du fonctionnement de la maintenance des systèmes de dépoussiérage de l'usine, ces travaux sont repartis comme suit:

Dans la première partie, nous avons étudié le cas du filtre hybride moyennant la méthode 5M pour pouvoir déceler les origines de pannes qu'il y avait dans le filtre et qui faisaient qu'il tombait souvent en panne, et par la même occasion nous avons fait une analyse AMDEC pour pouvoir prévoir un plan d'action de prévention pour les filtres à manches et électriques à la fois que l'on allait exploiter dans l'élaboration des gammes de visites du cahier de charge pour les sous-traitants. Et comme bon résultat de notre étude, on peut remarquer que le filtre hybride n'est plus tombé en panne ni émis de poussière depuis notre intervention et attendant le changement de la position de la gaine de tirage qui se fera dans l'un des prochains arrêts programmés.

Pour pouvoir faire un suivi spécifique de chaque filtre, le chapitre 4 présente un outil informatique que l'on a créé après avoir élaboré et mis à jour la base de données des filtres. Il s'agit d'un outil simple et interactif permettant la gestion de façon aisée de la maintenance des installations de dépoussiérage, mais permettant surtout le suivi de ces installations en termes de pannes, natures des interventions, besoin en pièces de rechange...cet outil peut être développé d'avantage en y introduisant des options d'impression, d'ajout de documents techniques aux répertoires, de calculs de fiabilités d'indices de disponibilités, de prévention de besoin et de stocks de rechanges...etc.

Dans la troisième partie, on avait étudié l'éventualité de sous-traiter la maintenance des installations de dépoussiérage et en chiffrant ce que nous coûte cette maintenance, et en élaborant un cahier de charges pour les sous-traitants. Après avoir consulté plusieurs sociétés spécialisées, nous avons trouvé qu'il était judicieux de passer à la sous-traitance, on va payer certes plus, mais la nature et la qualité des prestations font que cette solution est la meilleure pour Lafarge, surtout que l'on avait une première expérience à Lafarge Bouskoura et que l'on était très satisfaits.

Bibliographie

- [1] Techniques de dépoussiérage des fumées industrielles. Stéphane BIOCCI et Corine L'HOSPITALIER, Edition Tec et Doc 2002.
- [2] Traite théorique et pratique du dépoussiérage industriel et de l'épuration des gaz. Raedt C, Edition Chevalier 1944.
- [3] Recensement des nouvelles technologies de dépoussiérage. François BATTISTONI, Alain GINESTET 2003.
- [4] Réseaux hydraulique. A.R.ELAZEHARI, Edition top press 2005.
- [5] Les couts directs et indirects autres termes de couts et de recettes. Dr Linar NADIG, Octobre 1999.
- [6] Les couts indirects de la maintenance. Houda EL AOUFIR et Driss BOUAMI, CPI'2005.
- [7] Externalisation de la maintenance, enjeux formels et juridiques de la relation contractuelle. Jean-claude FRANCASTEL, AFIM Alsace mars 2008.
- [8] Rapport de projet de fin d'études : étude des installations de dépoussiérage des ateliers BC1 et BC2 de l'usine de Lafarge Bouskoura. Mlle Siham FDAILI, PIFE ENSAM, 2003.
- [9] www.wikipédia.com. Encyclopédie en ligne [définitions et historiques].
- [10] www.webprofesseur.com/vb6/VB.HTM, Formation en Visuel Basic 6 (autoformation en Visuel Basic 6 pour l'élaboration de GEMAFIL).
- [11] www.techniques-ingenieur.fr, [Bernard SIRET, dépoussiérage et dévésiculage, J35580]

Liste des annexes

Annexe 1 : Listes des filtres de dépoussiérage installés dans l'usine.

Annexe 2 : Gammes de visites des filtres de dépoussiérage.

Annexe 3 : Grille de cotation de la criticité des défaillances.

Annexe 4 : Tables AMDEC.