

REPUBLIQUE DU SENEGAL

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE

Centre de THIES

DEPARTEMENT GENIE ELECTROMECHANIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR DE CONCEPTION

Titre :

« Le dépoussiérage et la filtration aux Ciments Du Sahel :
Etude du fonctionnement et de la maintenance du Baghouse »

Auteur : M. Henri F. DIADHIOU

Directeur interne : M. Khalifa SIBY

Directeur externe : M. Ousmane THIAM NIANG

Juillet 2008

Sommaire :

Il y a quelques années la culture du respect de l'environnement au Sénégal n'avait pas une envergure aussi grande que l'impose aujourd'hui la nécessité de protéger la nature sous toutes ses formes. Des études et analyses avaient pourtant montré que les sources de pollution les plus grandes étaient les usines de production en général, dont les rejets (chimiques ou bactériologiques) découlant de leur processus de fabrication sont les plus grands ennemis de la planète bleue.

Les cimenteries sont, pour leur part, dans la catégorie des potentiels pollueurs de l'atmosphère du fait des émanations de poussières provenant de leurs équipements. Notre étude sera axée sur le cas des Ciments du Sahel, entreprise hôte de ce projet de fin d'études. Les objectifs visés sont tout d'abord la maîtrise du fonctionnement de leurs équipements de filtration, puis l'élaboration d'une méthode de leur diagnostic et enfin la proposition d'interventions amélioratives sur ces dispositifs.

Dans la première partie, nous nous attèlerons à une brève présentation des Ciments du Sahel en terme d'organisation de l'entreprise, de la nature de ses produits et de l'agencement de son processus de fabrication. Dans le second chapitre, nous parlerons essentiellement du dépoussiérage et de la filtration dans le cadre général, en mettant en exergue les diverses techniques et appareils créés à cet effet. Le troisième chapitre passera en revue la situation qui prévaut au sein de l'entreprise par le recensement du parc du matériel de dépoussiérage installé. Le quatrième chapitre est la partie la plus essentielle du projet. Elle traitera du grand filtre de dépoussiérage du broyeur de farine crue et du four rotatif de la cimenterie. Il sera question de l'étude de sa constitution matérielle et de son fonctionnement par rapport aux équipements qui forment son environnement. C'est une partie tournée vers l'aspect de la maintenance avec des méthodes d'améliorations en recommandation.

Cette étude aura permis d'avoir une vue complète sur tout ce qui traite de la filtration et des réseaux aérauliques dimensionnés pour cela. Elle a permis de montrer l'importance du point de fonctionnement de ces derniers. Le rendement est un des facteurs clé de la consommation énergétique dont la surveillance et l'optimisation pourraient être des sources d'économies non négligeables. A titre d'exemple, nous recommandons de donner plus d'attention aux ventilateurs d'air qui font partie des éléments les plus critiques.

Remerciements

Je tiens à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de ce document. Je voudrais nommer tout particulièrement :

- La **Direction générale des Ciments Du Sahel** qui m'a proposé ce projet et qui n'a ménagé aucun effort afin de me mettre dans les meilleures conditions de travail ;
- Le **Directeur d'Exploitation M. NDIAYE** et son adjoint **M. THIOUNE** qui ont donné leur accord lors de la proposition de ce projet ;
- **M. Ousmane THIAM NIANG, chef de la division maintenance**, qui m'a encadré tout le long de ce travail, dont la disponibilité et les conseils ont été d'un grand apport ;
- **M. Khalifa SIBY** qui a jeté les bases du travail et qui m'a fait profiter de son savoir faire pour pouvoir mener à bien cette étude ;
- **Messieurs les professeurs** qui m'ont appuyé à un moment ou à un autre du courant de cette année ;
- Tous les **agents des Ciments Du Sahel** qui ont participé de manière active aux avancées de ce projet.

Table des matières :

Nomenclature	6
Introduction générale	7
Chapitre I. Présentation des Ciments Du Sahel S.A.	9
A. Introduction	10
B. Organisation de l'entreprise	10
C. Principe chimique de fabrication du ciment	11
D. Processus de fabrication du ciment	13
1. Préparation des matériaux	13
2. Traitement et cuisson de cru	14
3. Traitement du clinker	15
E. Conclusion	16
Chapitre II. Généralités sur le dépoussiérage et la filtration	17
A. Introduction : Théorie de la filtration	18
B. Techniques de dépoussiérage et de filtration	19
1. Séparateurs à effet mécanique	19
a) Cyclones	19
b) Séparateurs centrifuges à rotor	21
2. Séparateurs à effet électrique	22
3. Séparateurs à media filtrants	23
a) Caractéristiques de fonctionnement	23
b) Élément critique du système : le medium filtrant	24
C. Conclusion	27
Chapitre III. Le dépoussiérage et la filtration aux C.D.S	28
A. Introduction	29
B. Les motifs de la filtration	29
1. La récupération des poussières	29
2. Les normes environnementales	29
C. Recensement du matériel de filtration de l'usine	30
1. Filtres Jet pulse et d'air inversé de la société FLSmidth	31
2. Filtres à manches et en série de la société Intensiv-Filter	35
D. Inventaire des filtres du processus de fabrication	35
E. Conclusion	37
Chapitre IV. Etude du filtre dépoussiéreur du broyeur de cru et du four	38
A. Introduction	39
B. Description et étude du fonctionnement automatique	39
1. Structure et principaux éléments de la géométrie	39
2. Eléments actifs et dispositifs indicateurs de paramètres	40
3. Principe de fonctionnement du système	43
a) Marche en mode filtration	43
b) Marche en mode nettoyage	44
C. Etude du réseau aéraulique	46
1. Généralités sur les réseaux aérauliques	47
a) Ecoulement en conduite	47
b) Ventilateurs centrifuges	59
2. Réseaux aérauliques du Baghouse	60
a) Réseau aéraulique de tirage en filtration	61
b) Réseau aéraulique de décolmatage	73
D. Conclusion	73

Chapitre V. Etude de la maintenance du Baghouse	75
A. Introduction	76
B. Modes de défaillance et maintenance curative	77
C. Planning d'inspections périodiques	78
D. Conclusion	84
Chapitre VI. Recommandations : optimisation du Baghouse	85
A. Introduction	86
B. Consommation énergétique du ventilateur de tirage	86
C. Régulation du débit d'alimentation du four	86
D. Régulation des volets d'entrée des trémies	87
E. Régulation du mode de nettoyage	87
F. Augmentation de la durée de vie des manches	88
G. Réduction des émanations de poussières	88
H. Conclusion	89
Conclusion générale	90
Références bibliographiques	92
Liste des figures	93
Liste des tableaux	94

Nomenclature

Symboles	Paramètres	Unités
Q	Quantité de chaleur échangée avec l'extérieur	J
W	Travail mécanique échangé avec l'extérieur	J
h	Enthalpie massique	J.kg-1
u	vitesse d'écoulement de fluide	m.s-1
z	hauteur géométrique d'un point du réseau	m
T ou t	Température	°C
S	Section de conduite	m ²
Pt, P*, Pa, Pd, Pb	Pressions totale, motrice, d'arrêt, dynamique, barométrique	Pa ou bar
Cp	Capacité thermique massique à pression constante	J.kg-1.K-1
γ	Poids volumique	N.m-3
λ	coefficient de pertes de charge linéiques	-
Re	Nombre de Reynolds	-
D	Diamètre de conduite	m
ε ou k	Rugosité absolue	mm
ζ	coefficient de pertes de charge singulières	-
H	Hauteur manométrique	m
ν	Viscosité cinématique	m ² .s-1
L	Longueur de conduite	m
ΔP	Perte de charge entre 2 points du réseau	Pa
ρ	Masse volumique	kg.m-3

Introduction générale

Durant ces trois dernières décennies, une importante attention a été accordée à la situation présente et au devenir de notre planète. La préservation de la nature est dès lors un concept d'actualité qui a conduit à la mise en place d'une réglementation dans presque tous les secteurs d'activités. Sur le plan de l'environnement, les méfaits d'une implantation de production, quels qu'ils soient, font l'objet d'une limitation très stricte et rigoureuse sous peine de sanctions sévères allant jusqu'à la cessation de ses activités. De ce point de vue, nous avons l'habitude de distinguer parmi les sources de problèmes:

- Le bruit
- Les rejets chimiques (solides, liquides...)
- Les émanations gazeuses ou poussiéreuses...

Les limites permises concernant ceux-ci ont fait l'objet de conventions conformément aux exigences de l'écosystème et ont été quantifiées et bien maîtrisées grâce à des études poussées dans ce domaine.

La réaction nette des usines telles que les cimenteries, face à ces normes de protection de l'environnement, se fait de plus en plus sentir. Elles mobilisent les voies et moyens pour arriver à réduire au maximum les rejets de poussières dans l'atmosphère. Cependant, des efforts considérables sont encore attendus du fait de l'exigence de performances plus accrues manifestée par les bailleurs de fonds et les agences bancaires.

Les normes actuelles font référence à des émanations inférieures à 50 mg/m³ vu son impact sur la végétation environnante et sur les changements climatiques si il de gaz à effet de serre. En réalité, le respect de ces réglementations procure le double avantage de préserver l'environnement et aussi de réduire les potentielles pertes de production par la récupération de matières.

Dans ce contexte, l'objet de ce mémoire est l'étude des mécanismes de dépoussiérage et de filtration des Ciments du Sahel S.A. Une attention particulière sera accordée au filtre le plus sollicité du système qui est le Baghouse, le filtre de dépoussiérage du broyeur de cru et du four rotatif

Après donc une présentation sommaire de l'usine, afin de mieux comprendre les phénomènes mis en jeu, nous allons procéder, dans un premier temps, à une présentation générale de la théorie et des méthodes de filtration existantes actuellement, des techniques et des appareils utilisés.

Nous ferons ensuite, dans le deuxième chapitre, un état des dispositifs présents dans les divers départements du processus de fabrication de l'usine. Les caractéristiques des différentes sortes d'appareillage y sont fournies ainsi que leur localisation à travers les diverses étapes de traitement du ciment.

La troisième partie, comme tout le reste d'ailleurs, traitera d'un de ces dispositifs tantôt évoqués, qui est le filtre à manches de dépoussiérage du broyeur de cru et du four rotatif : le Baghouse. La description et l'étude de son fonctionnement de cet équipement nous permettront d'observer son comportement relativement aux machines auxquelles il est connecté. En outre, l'étude du réseau aéraulique dans lequel il est inséré, nécessitera la connaissance de certains concepts de la mécanique des fluides afin de mettre en évidence son point de fonctionnement pour divers mode de marche de l'équipement.

L'étude de la maintenance et la proposition d'éventuelles améliorations formeront la dernière partie du projet. La détermination d'un planning de suivi du Bag House et l'étude de la consommation d'énergie des ventilateurs d'air ainsi que de l'utilisation des éléments de rechange sont l'objet de ce dernier chapitre.

Nous clorons ce document à travers certaines recommandations d'optimisation du fonctionnement global du système tant sur le plan de la consommation énergétique que sur la régulation de son fonctionnement par rapport aux exigences des paramètres de marche de dispositifs tels que l'alimentation du four rotatif.

Chapitre I. Présentation des Ciments Du Sahel S.A.

A. Introduction

Les Ciments Du Sahel S.A., situé aux environs de la localité de Kirène dans la région de Thiès, est une cimenterie inaugurée depuis l'année 2005. Avec une capacité annuelle de production prévue de 600.000 tonnes, elle atteint aujourd'hui près de 1.200.000 tonnes et constitue, avec la SOCOCIM, les deux seules cimenteries actuellement opérationnelles au Sénégal.

Dotée d'équipements de bonne technologie, cette usine est capable de supporter la concurrence au sein du marché qui, sous peu, va devenir plus prisé avec l'arrivée de nouvelles cimenteries. Cependant, son extension est déjà entamée et une nouvelle ligne de production est en cours de réalisation.

Dans cette partie, nous allons procéder à une brève présentation de l'entreprise en déroulant de manière peu exhaustive son organigramme. Nous passerons ensuite à la description du produit qu'elle fabrique, de sa constitution chimique avant d'aborder le processus propre de sa fabrication. Nous tenterons de mettre en exergue les diverses étapes de traitement du ciment où nous pourrions voir les principaux équipements en service dans l'usine.

B. Organisation de l'entreprise

L'entreprise « Les Ciments Du Sahel S.A. » constitue une société anonyme regroupant près de 300 à 400 employés répartis dans divers secteurs de l'usine.

A la tête de cette dernière, nous avons la Direction Générale qui coiffe toutes les autres structures que sont : la Direction Commerciale, la Direction d'approvisionnement, la Direction Financière et Comptable et la Direction d'exploitation.

C'est la Direction d'exploitation qui est en charge de la marche propre des installations et du processus de fabrication.

Elle est divisée en départements qui sont: le Département Génie civil, le Département Qualité, le Département Production, Département Etudes et Réalisation électriques, le Département Contrôle qualité, le Département Hygiène Sécurité Environnement, le Département Science de la terre, le Département Automobile et le Département Maintenance.

L'organigramme décrit par le schéma suivant montre les divers secteurs évoqués plus haut mais n'est détaillé que pour la Direction d'exploitation et plus encore pour le Département Maintenance qu'elle coiffe.

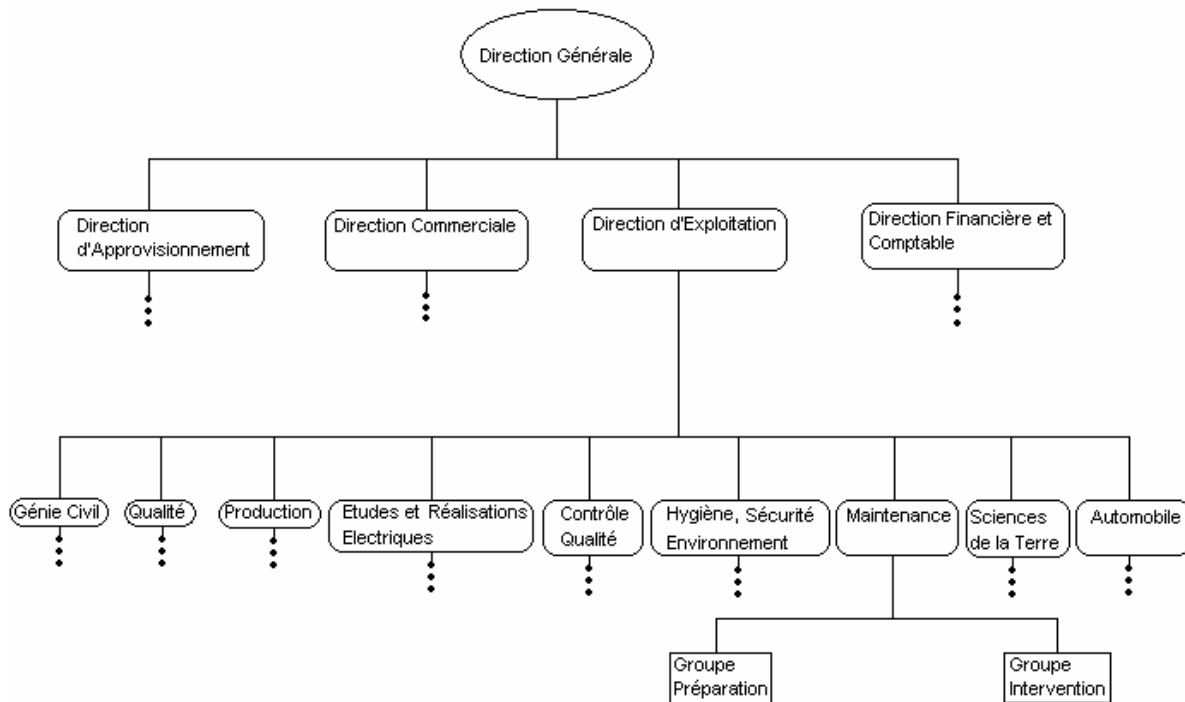


Figure 1: Organigramme de l'entreprise

Une description bien plus détaillée que ce qu'offre ce schéma aurait permis de distinguer une très bonne gestion des moyens humains et matériels. L'objectif visé étant de satisfaire les besoins du marché, toute cette organisation n'est mise sur pied que dans un seul but : fournir un produit de qualité. Le ciment est en effet le fruit d'un travail minutieux pour avoir les caractéristiques pour lesquelles il est acheté.

C. Principe chimique de fabrication du ciment

Le ciment est un liant hydraulique fabriqué à partir du calcaire et d'une source de silice et d'alumine telle que l'argile. Ce mélange broyé puis cuit et ajouté à du gypse donne le produit final après un autre broyage. Les éléments de base du ciment sont donc :

- La chaux CaO : C
- L'alumine Al_2O_3 : A
- La ferrite Fe_2O_3 : F
- La silice SiO_2 : S

Ces éléments de base sont contenus dans beaucoup de pierres mais aux C.D.S. les matériaux de base utilisés sont :

- Le calcaire (l'élément incontournable) : haut titre si la quantité de chaux est supérieure à 52% et bas titre si cette quantité est comprise entre 48 et 52%. Il contient aussi du A, du F et du S ;
- La latérite qui contient du A, du F et du S.
- Le mélange d'argile et de calcaire qui contient tous les composants

Pour obtenir le ciment, nous avons parlé tantôt de cuisson de la matière. En effet, après avoir mélangé les divers constituants à des doses bien déterminées, ils sont acheminés dans un four où l'ensemble est élevé à une température d'environ 1450°C. Quatre composants naissent des réactions chimiques induites lors de la cuisson. Il s'agit :

- Du silicate bicalcique (C_2S) représentant 50 à 60% et responsable du durcissement à long terme du ciment ;
- Du silicate tricalcique (C_3S) représentant environ 20% et responsable du durcissement à court terme ;
- De l'aluminate tricalcique (C_3A) représentant 5 à 10% et est le composant le plus réactif et cause de dégagement de chaleur ;
- De l'alumino ferrite tétracalcique (C_4AF) présent à environ 10% dans le ciment et peut influencer la température de formation du clinker.

Il faut noter la présence en petite quantité de magnésie MgO et d'alcalis Na_2O et K_2O .

Pour avoir des caractéristiques de clinker et des conditions de cuisson bien définies, le dosage de la farine est très important. Des modules de référence sont prévus à cet effet et leur valeur varie d'une cimenterie à une autre en fonction de leurs méthodes de fabrication.

Ces modules sont :

- Le module LSF qui est fonction du potentiel d'attaque de la chaux :

$$LSF = \frac{100 * C}{2,8 * S + 1,18 * A + 0,65 * F}$$

- Le module silicique M_S qui permet d'influencer la fusion : $M_S = \frac{S}{A * F}$
- Le module aluminique M_A qui contrôle la viscosité : $M_A = \frac{A}{F}$

Comme nous l'avons souligné auparavant, la valeur de ces modules dépend de l'usine considérée. Cependant, nous pouvons avoir les plages suivantes :

$$\begin{cases} 90 < LSF < 98 \\ 2,4 < M_s < 3 \\ 1 < M_A < 2 \end{cases}$$

La circulation des volatiles comme les chlorures et les alcalis dans le four sont susceptibles de perturber la cuisson. Pour contrôler ce facteur, on définit la volatilité par un coefficient ε donné par :

$$\varepsilon = 1 - \frac{\%V_{clink}}{\%V_{C5}} \text{ Avec } \%V = \text{pourcentage des volatiles dans le clinker et dans le cyclone n°5}$$

Derrière cet aspect chimique de fabrication du ciment, il y a tout un ensemble d'équipements. Ces derniers forment un ensemble très automatisé et bien contrôlé dont allons faire le descriptif.

D. Processus de fabrication du ciment

Le processus de fabrication du ciment semble être identique, du point de vue du principe, pour la quasi-totalité des cimenteries. Les diverses étapes de traitement de la matière pour aboutir au produit fini sont toujours les mêmes à partir de l'approvisionnement jusqu'à l'ensachage.

1. Préparation des matériaux

• L'approvisionnement

Pour fabriquer le ciment, il faut nécessairement 4 éléments essentiels qui sont: le calcaire, l'argile, la latérite et le gypse. Les trois premiers proviennent des carrières de l'usine qui sont en marge de l'espace occupé par les unités de fabrication, tandis que le gypse est une matière d'exportation qui est incontournable pour la cuisson.

En outre, le charbon constitue un autre élément d'approvisionnement destiné à l'alimentation du four en énergie calorifique.

• **Le concassage primaire**

La matière provenant des carrières est en général d'une très grosse granulométrie. Les étapes suivantes dans le processus n'admettent pas cependant une certaine taille des grains et, c'est pour cette raison qu'un concassage primaire par un concasseur à marteaux est effectué pour une première mouture à 650 tonnes/heure. La grosseur des blocs est ainsi considérablement réduite pour permettre aux machines en aval de pouvoir les traiter et les transformer.

• **Le transport et le stockage de matières**

A partir du concasseur, un système de transport et d'aiguillage par bandes conduit les matières premières vers les principaux lieux de stockage.

En effet, une partie du calcaire et de l'argile est acheminée vers le dôme de pré homogénéisation en passant par le tour d'angle A. Un mécanisme, le gratteur circulaire, servant de mélangeur sera chargé d'effectuer un brassage de ces deux matériaux pour donner une seule farine: «le mélange». Le reste non mélangé poursuit son cheminement vers le tour d'angle B pour alimenter le Hall des ajouts. Dans ce dernier, il y a un tas pour chaque type de matière (argile, calcaire, latérite et gypse).

Le mélange du dôme de pré homogénéisation et toute la matière du hall des ajouts excepté le gypse, repassent au tour d'angle B où passe aussi le charbon pour son premier traitement.

Les trémies doseurs et la trémie charbon sont désormais les prochaines destinations de la matière.

2. **Traitement et cuisson de cru**

• **Le broyage de la matière crue**

Le broyage est une étape destinée à l'affinement de grains.

Après avoir déterminé par une consigne la teneur des différents composants, les trémies doseurs envoient le mélange obtenu dans le broyeur vertical par une bande de transport. La farine, dont le principe d'obtention (le broyage) sera explicité ultérieurement, est acheminée vers le silo homo en passant par deux cyclones de récupération et éventuellement le grand filtre Baghouse.

Par les mêmes principes de dépoussiérage et de tirage, le broyeur de charbon alimente le doseur Pfister pour l'utilisation dans le four.

• **La cuisson**

Le mélange homogène et le fin charbon récupérés dans leur silo respectif sont prêts pour franchir l'étape de la cuisson au niveau du four rotatif cylindrique. A partir du bas du silo homo, le mélange est acheminé vers le haut de la tour échangeur par un élévateur à godets et doit atteindre le précalcinateur à sa base. Au même moment, le charbon brûlé procure la flamme à la sortie matière du four. Avec le système formé de 5 cyclones, la matière évolue à contre-courant par rapport au flux d'air ascendant créé tout le long de la tour. Elle pénètre dans le four où la température peut atteindre 1400°C (température de clinkérisation). Le produit obtenu à la sortie est le clinker qui, avec le gypse, le calcaire et quelques ajouts, donne le ciment.

3. Traitement du clinker

• **Le refroidissement et le concassage**

Le clinker obtenu subit à la sortie du four un refroidissement brusque et ramène sa température d'environ 1200°C à 70°C. Cette opération, qui s'accompagne de transformation de la structure cristalline du matériau, donne naissance à des blocs durs et grossiers de matière qui doivent faire l'objet d'un autre concassage pour enfin être acheminés vers le silo de clinker de capacité de stockage de 16.000 tonnes.

• **Le broyage du ciment**

Comme relaté tantôt, le ciment est composé de clinker, de gypse, de calcaire et d'ajouts. Que ce soit du hall des ajouts ou du silo clinker, tous passent par le tour d'angle C pour atteindre le rotary gate, un système d'aiguillage pour le remplissage des diverses trémies de chargement pour le dosage avant le broyeur ciment.

Ce dernier est muni de boulets de dimensions différentes pour donner de la farine très fine. Les 4 silos de ciment recueillent ainsi le ciment prêt à l'ensachage puis à la livraison en vrac.

Voici donc globalement le processus de fabrication du ciment (décrit par le diagramme ci-après) qui intègre un vaste système d'équipements haut de gamme.

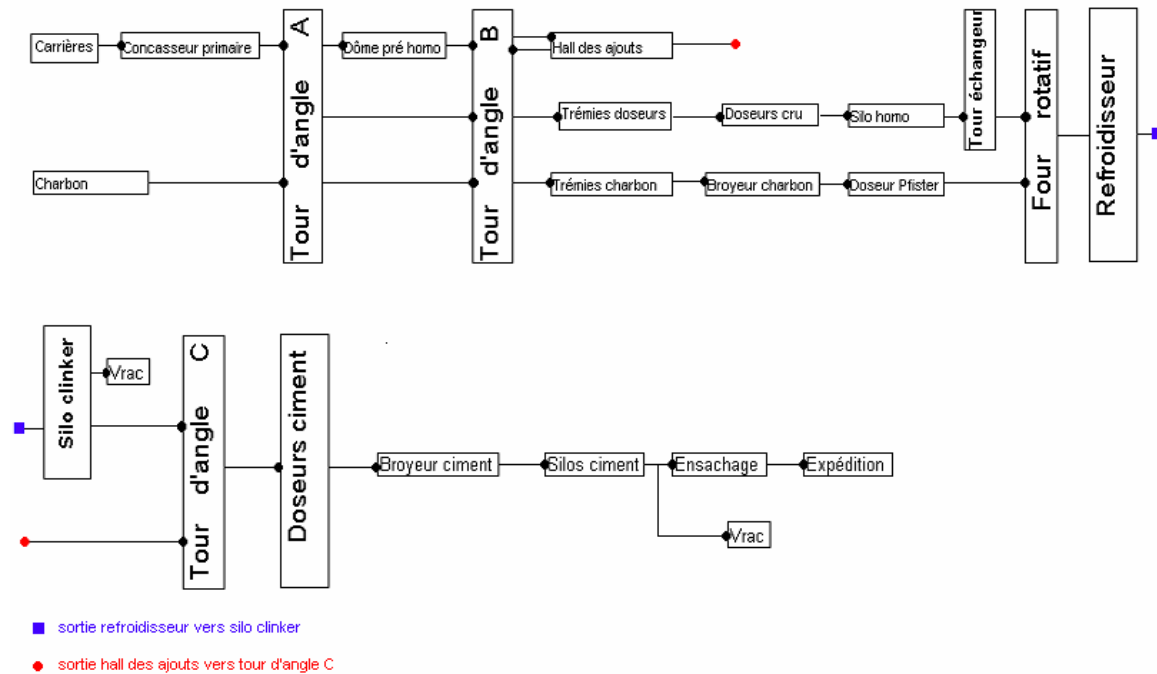


DIAGRAMME SYNOPTIQUE DU PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT

Figure 2: Diagramme synoptique du processus de fabrication

E. Conclusion

Le diagramme synoptique ci-dessus montre tout le circuit que la matière d’approvisionnement traverse pour être transformée en produit fini. Des carrières jusqu’à l’ensachage et l’expédition, les moyens matériels mis en jeu sont énormes avec des machines de grandes puissances.

Cependant, les matières traitées étant exclusivement des poussières, il est plus qu’obligatoire de pouvoir contrôler leur mouvement au sein même des machines. En effet, les fines particules, par exemple lors du transport de matières, d’un système à un autre, peuvent gagner l’atmosphère car l’effet de leur poids ne leur permet plus de rester sur les bandes transporteuses. En outre, c’est aussi pour un souci de maintenabilité des machines et de la limitation de l’usure de leurs éléments que leur dépoussiérage est important.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour le dépoussiérage et la filtration. L’efficacité change avec la nature des dispositifs et parfois leur combinaison procure plus de satisfaction.

Chapitre II. Généralités sur le dépoussiérage et la filtration

A. Introduction : Théorie de la filtration

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

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

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

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

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

Après avoir dépouillé les particules les plus fines des machines, la récupération et la réintégration de la matière dans le processus de traitement impose la dissociation de la matière d'avec l'air transporteur.

C'est à ce moment que débute le phénomène de filtration des poussières. Ce principe peut être apparenté suivant les cas à deux autres, le tamisage et de l'aiguillage, basés sur la notion de sélectivité. Il est question donc de laisser s'échapper l'air et de retenir la poussière grâce à un écran poreux, de dévier magnétiquement ou encore mécaniquement sa trajectoire (des particules au besoin préalablement chargé) par rapport à celle de l'air afin de les guider en un point bien précis pour les emmagasiner.

En résumé, les principaux éléments qui déterminent les conditions de filtration sont:

- la **grosseur des particules** à dévier ou à retenir,
- les **propriétés** telles que la porosité de l'écran filtrant,
- la **puissance du dispositif magnétique ou mécanique** de déviation

Nous pouvons donc constater que le dépoussiérage et la filtration sont très souvent indissociables dans presque tous les systèmes à émanation de poussières. Le dysfonctionnement de l'un ou l'autre de ces deux procédés diminuerait dans pratiquement les mêmes proportions l'efficacité de la récupération de la matière.

B. Techniques de dépoussiérage et de filtration

Les systèmes d'aspiration et de dépoussiérage de machines utilisés en industrie sont très diversifiés. Ils se différencient les uns des autres essentiellement par leurs principes de fonctionnement et leur capacité de captation des particules.

Les systèmes de dépoussiérages sont essentiellement divisés en 3 catégories:

- Les **séparateurs à effet mécanique**
- Les **séparateurs à effet électrique**
- Les **séparateurs à média filtrants**

1. Séparateurs à effet mécanique

Les séparateurs à effet mécanique, comme leur nom l'indique, mettent en jeu une force mécanique pour faire la séparation des particules et du fluide transporteur par la pesanteur, l'inertie ou la force centrifuge.

Dans cette gamme de séparateurs nous pouvons citer les systèmes inertiels, les chambres de sédimentation, les séparateurs centrifuges à rotor et les cyclones. Cependant, nous traiterons essentiellement de ces deux derniers types de séparateurs puisqu'ils sont principalement les plus utilisés dans le milieu industriel. Il est à préciser que ces dispositifs ne peuvent être utilisés pour séparer des gaz les uns des autres mais seulement des particules solides grâce à leur masse volumique qui est souvent 500 fois supérieure à celle d'un gaz porteur.

a) Cyclones

L'utilisation des cyclones dans les systèmes industriels date de très longtemps et au fil des années plusieurs formes et dimensions leur ont été données. En effet, la géométrie est très déterminante du fait de son influence sur la force centrifuge à l'intérieur du cylindre et donc sur les performances de l'appareil. Les paramètres à surveiller pour garantir l'efficacité de ce dispositif sont donc:

- La **hauteur du cyclone** qui détermine le temps de séjour du fluide en son sein
- La **vitesse tangentielle** du fluide
- Le **diamètre du corps** du cyclone.

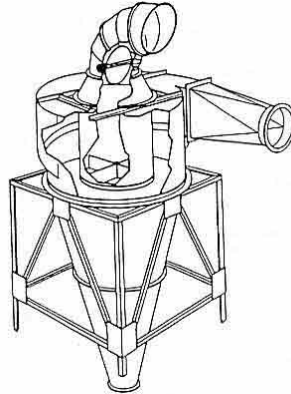


Figure 3: Schéma d'un cyclone

Pour pouvoir distinguer les divers types de cyclones, il faut se référer au mode de déplacement relatif des poussières et du gaz porteur. En effet, lors de la séparation, ces deux constituants peuvent cheminer dans le même sens d'écoulement ou non. Selon ces deux cas considérés, les cyclones peuvent être :

- **à retournement de flux**: dans ce cas, on a une entrée tangentielle extérieure par volute ou hélicoïdale par dessus du mélange. A la séparation, les gaz sortent par une cheminée centrale par le dessus et les poussières sont évacuées à la base d'une partie conique;
- **de type axial** : ici, l'entrée du mélange se fait à une extrémité puis la sortie des gaz au centre et des poussières à la périphérie de l'autre extrémité.

Le choix d'une entrée axiale ou tangentielle n'a aucun effet considérable sur les performances d'un cyclone. Celles-ci ne sont en réalité améliorées que par leur combinaison à d'autres petits systèmes presque toujours placés en aval et exploitent la rotation résiduelle du fluide à la sortie.

Le principe de fonctionnement du cyclone est relativement simple. A la bouche d'entrée du dispositif, le mélange air-poussières est immédiatement entraîné en mouvement de rotation du fait de la courbure de la paroi. Le tourbillon engendré confère aux particules une énergie cinétique centrifuge qui tend à les plaquer sur la surface interne des cylindres. Ce phénomène

implique que les poussières se déchargeront au premier orifice qu'elles rencontreront. Quant aux gaz, ils sont entraînés vers un cylindre ou jupe au centre par un tourbillon ascensionnel dû à la différence de pression entre l'intérieur du cyclone et le milieu atmosphère.

Les cyclones peuvent donc assurer le captage des poussières de 5 à 30 μm même si leur efficacité devient faible pour des particules de moins de 10 μm . Toujours dans le but d'accroître les performances de filtration, ces dispositifs sont parfois couplés et on parle à partir de ce moment de systèmes multi cyclones.

b) Séparateurs centrifuges à rotor

L'allure géométrique de ce type de séparateur fait penser à celle des cyclones étudiés plus haut. Cependant, le séparateur centrifuge à rotor intègre plus d'éléments dans sa conception. Il est constitué :

- d'un **cyclone** ;
- d'une **cartouche filtrante** entraînée en rotation par un moteur au centre de celui-ci ;
- d'**aubages fixes** en aval du rotor ;
- d'un **système intégré de décolmatage** de la cartouche à air pulsé ou à pulvérisation d'eau selon l'exigence du processus de traitement.

Le composant actif dans le fonctionnement du séparateur centrifuge est bien évidemment le moteur qui est en charge de mener en rotation la cartouche filtrante mais aussi de permettre le mouvement du fluide dans le réseau par la dépression qu'il occasionne. Au passage, les particules sont captées par la cartouche et donc séparées de l'air qui les transportait. Par intervalles de temps bien définis, un mécanisme de décolmatage est enclenché pour nettoyer la cartouche en rotation et récupérer la matière au bas du séparateur.

Malgré la faiblesse relative des pertes de charge occasionnées par son insertion dans un système de dépoussiérage, le RPS n'a depuis sa réalisation pu atteindre un taux d'émission minimum de $50\text{mg}/\text{m}^3$. Aussi, il est moins efficace qu'un cyclone du point de vue de l'énergie consommée pour son fonctionnement, des coûts potentiels de maintenance occasionnés, de l'achat du matériel de rechange tel que les cartouches filtrantes. D'ailleurs, leur fiabilité mécanique pour les fumées industrielles reste à être prouvée.

2. Séparateurs à effet électrique

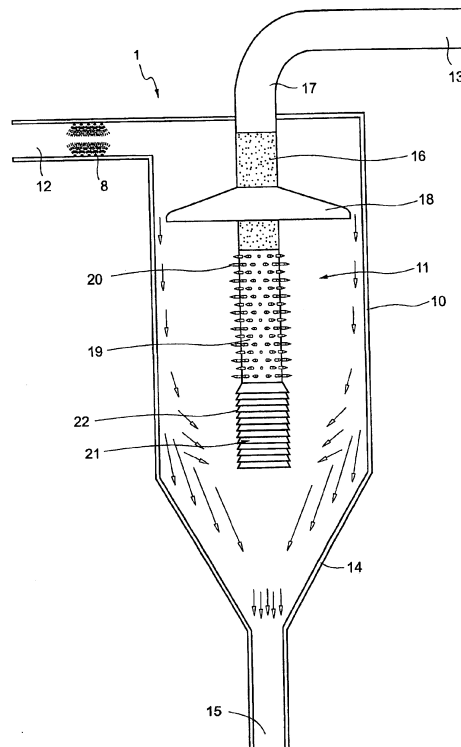


Figure 4: Schéma d'un séparateur électrostatique

NB: 1 enceinte- 10 paroi cylindrique- 11 chambre- 12 entrée d'air sale- 14 trémie- 15 sortie de matière- 13 sortie d'air propre- 16 tube d'isolation électrique- 17 conduite- 18 distributeur- 19 générateur d'ion- 20 électrodes radiales- 21 collecteur de gaz- 22 vannes

Les séparateurs électrostatiques, comme leur nom l'indique, utilisent un champ électrique pour dissocier les particules du gaz transporteur. Ils ne regroupent que deux catégories en leur sein et peuvent donc être soit secs, soit humides.

Il est à noter que les séparateurs électrostatiques humides (WESP) sont 10 fois plus performants que les séparateurs électrostatiques secs (ESP) car pouvant assurer le captage des poussières de 0.1 à 1 μm suivant la tension appliquée.

Néanmoins, le grand problème des séparateurs électrostatiques est le réentraînement des particules après le décolmatage mécanique des tôles de récupération des poussières. Comme pour les cyclones, ces baisses de performance peuvent être palliées grâce à l'intégration d'autres systèmes. A titre d'exemple, des études avaient été menées pour trouver la possibilité d'effectuer ce décolmatage hors de la zone d'entraînement du champ électrostatique.

A partir des diverses conclusions auxquelles elles ont abouti, la mise en place d'électrodes collectrices rotatives a permis de résoudre ce problème de nettoyage des particules déjà déviées.

Comparé à celui du cyclone, le principe de fonctionnement des séparateurs électrostatiques est tout aussi simple. En effet, les particules contenues dans le fluide porteur sont au préalable chargées positivement avant d'atteindre l'intérieur du séparateur. A leur entrée, ils se séparent des gaz par l'attraction des tôles collectrices chargées, mais négativement. Comme nous l'avions mentionné plus haut, le décolmatage de ces tôles s'effectue mécaniquement par des vibrations, une pulvérisation d'eau ou un frappage de marteaux.

Du point de vue du captage mais aussi de l'encombrement, nous remarquerons donc que ces séparateurs sont bien plus performants que ceux précités même si l'énergie mise en oeuvre est bien supérieure.

3. Séparateurs à media filtrants

Les séparateurs à média filtrants sont tout aussi diversifiés sinon plus que ceux précités. Pour des concentrations de poussières très élevées, on parlera, dans le langage courant industriel, de dépeussieres. Ce sont des dispositifs qui utilisent l'effet de l'auto filtration. En effet, Les poussières se séparent des gaz par elles-mêmes en se déposant sur un support poreux ou médium pour former le gâteau de poussières.

C'est en réalité cette couche de matière qui assure la filtration car les pores des média ont un diamètre beaucoup plus grand (100 à 500µm pour les média tissés et 10 à 50µm pour les média feutres) que les dimensions des particules à retenir.

Le tamisage des manches ne peut donc à lui tout seul assurer l'efficacité de la filtration. Aussi, nous pouvons aisément deviner qu'au bout d'un temps plus ou moins long de filtration, un mécanisme de nettoyage des média est nécessaire.

a) Caractéristiques de fonctionnement

Les séparateurs à média filtrants peuvent être décrits comme des enceintes chaudronnées équipées en partie basse de trémies destinées à recueillir la poussière et d'un système d'extraction en continu de celle-ci. Ils peuvent être constitués de plusieurs compartiments ou cellules. A l'intérieur de ces compartiments sont placés les médias dont les plus utilisés sont les manches cylindriques.

Dans ce qui suit, nous étudierons plus particulièrement ces filtres à manches dont le type peut être déterminé par le mode de nettoyage. Vu sous cet aspect, les filtres à manches sont :

- A **décolmatage on-line** : qui consiste à injecter de l'air comprimé dans l'axe des manches pendant un temps plus ou moins court (de l'ordre de 100 à 500 ms) pour provoquer le décrochement du gâteau de poussières. La variation des pertes de charges occasionnées par le filtre est donc relativement faible et la capacité de filtration bien contrôlée ;
- A **décolmatage off line** : qui implique la répartition du filtre en compartiments. Ces derniers sont isolés un à un lors du nettoyage souvent assuré par un courant d'air inverse. Toutefois l'efficacité de ce décolmatage étant supérieure à celle du précédent, le décochage du gâteau de poussières est aussi plus important. Il s'en suit que les performances de la filtration sont temporairement amoindries du fait de la variation importante des pertes de charges.

b) Elément critique du système : le medium filtrant

Comme nous l'avons mentionné un peu plus haut, les média des dépoussiéreurs peuvent être à poches, à cartouches ou à manches.

Le coton et la laine furent les premières matières utilisées pour leur conception. Aujourd'hui, les fibres synthétiques ou encore la fibre de verre ont pris le dessus. C'est donc pour des raisons pratiques que nous ne nous attarderons pas sur ces types de média classiques déjà « anciens ». Il serait en effet plus intéressant de faire un inventaire des divers types de fibres et de média qui sont en ce moment sur le marché.

(1) Matériaux de fabrication utilisés

Les fibres utilisées pour la confection des média peuvent classées en deux catégories :

- les **fibres organiques** telles que la fibre naturelle d'amiante, la fibre de verre, de carbone et la fibre métallique...
- les **fibres inorganiques** telles que les fibres naturelles comme la laine, la soie et le coton ; et les fibres synthétiques comme le polyester, le polyéthylène et la fibre acrylique.

Le tableau 1 suivant dresse la liste (non exhaustive) des fibres présentes sur le marché ainsi que leur fournisseur.

Fibres	Matière	Fabriquants
NOMEX [®]	Méta aramide	Dupont
KERMEL [®]	Méta aramide	Kermel
TEIJINCONEX [®]	Méta aramide	Teijin
TECHNORA [®]	Para aramide	Teijin
ESTENE [®]	Polyester	Sider Arc
MERAKLON [®]	Polypropylène	Meraklon
CRINLENE [®]	Polypropylène	Sider Arc
P84 [®]	Polyimide	Inspec Fibres
RICEM [®]	Polyacrylonitrile	MonteFibre
SIDLION 6 [®]	Polyamide	Sider Arc
SIDLION 6.6 [®]	Polyamide	Sider Arc
PROFILEN [®]	Polytétrafluoroéthylène	Lenzing
TEFLON [®]	Polytétrafluoroéthylène	Dupont
EMMITEX [®]	Polytétrafluoroéthylène	Filtec
TROL [®]	Polyoléfine	Filtec
RYTON [®]	Polysulfure de phénylène	CPChem
PORCON [®]	Polysulfure de phénylène	Toyobo
FORTON [®]	Polysulfure de phénylène	Ticona

Tableau 1 : Liste des fibres disponibles sur le marché

Chacune des fibres que nous venons d'énumérer présentent des caractéristiques qui leur sont propres. A titre d'illustration, nous nous proposons de faire une présentation sommaire de quelques unes décrites par leur constructeur :

- la fibre **KERMEL[®]** en méta-aramide a spécialement été conçue pour des applications industrielles comme la filtration de gaz chauds. Elle peut être utilisée à des températures de 200 à 240°C en pointe et possède une bonne résistance à l'abrasion ;
- la fibre **TEIJINCONEX[®]**, aussi en méta-aramide, est caractérisée par sa bonne résistance à la température et la conservation de ses propriétés et de ses dimensions à haute température ;

- la **fibre TECHNORA[®]**, du même constructeur que la fibre TEIJINCONEX[®], peut être utilisée à des températures de 200°C en continu et 250°C en pointe. Elle a aussi la particularité d'être résistant aux acides, aux alcalins et solvants organiques ;
- la **fibre P84[®]** présente une section droite lobée et donc susceptible de d'augmenter jusqu'à 60% sa surface relativement aux fibres à section circulaire. Les média filtrants réalisés avec cette fibre ont une efficacité de filtration accrue vis-à-vis des particules les plus fines. Elle résiste à des températures de 260°C en continu comme en pointe (courte durée).

(2) Types de media fabriqués

D'après la quantité de fibres disponibles, cela va sans dire que les media filtrants utilisés en dépoussiérage industriel peuvent être de nature bien différente. L'assemblage de ces fibres permet d'obtenir deux types de produits : les **tissus** et les **feutres**.

Les tissus aussi appelés média tissés sont constitués de fibres entrelacées formant une grille. Les feutres sont, pour leur part, sont formés par empilage de fibres sur un support formant une grille. Les fibres de ces média non tissés sont comprimées mécaniquement sans produits liants et l'ensemble est de plus en plus souvent aiguilleté. On parle dès lors de média feutres aiguilletés qui entraînent progressivement la disparition des tissus.

La politique actuelle vise à concevoir des médias filtrants de mettre en œuvre une filtration de surface et un décolmatage facilité. Le deuxième critère est la conséquence directe du premier étant donné que c'est parce que la poussière est retenue juste à la surface que le nettoyage sera facile. L'autre objectif à atteindre sera d'avoir une perte de charge plus ou moins constante durant le fonctionnement.

Si du point de vue macroscopique, les propriétés recherchées sont l'efficacité de la filtration de surface, la facilité du décolmatage, la durée de vie ; du point de vue microscopique, on s'intéressera plus à la résistance à la température, à l'abrasion et aux agents chimiques.

Le diamètre et la forme de la fibre utilisée a une grande influence sur l'efficacité du médium. Elle est d'autant maximisée que le diamètre de la fibre est petit et sa section de forme lobée.

C. Conclusion

Nous venons de voir les diverses techniques de dépoussiérage actuellement rencontrées dans le domaine de l'industrie. Les systèmes en question font jusqu'à présent l'objet d'étude dans le but d'améliorer les performances de dépoussiérage et de filtration. Des dispositifs toujours plus efficace sont mis sur pied grâce à des méthodes telles que la ponction, la combinaison de sous systèmes.

Pour rentrer dans le vif du sujet de ce projet, il serait intéressant de faire l'inventaire du matériel de dépoussiérage aux Ciments Du Sahel, car, comme nous l'avons souligné, la diminution des émissions poussiéreuses est une de leurs priorités. Dans cette partie, vous noterez plus loin que malgré la présence de quelques cyclones (au niveau du tour échangeur), nous nous appesantirons plutôt sur les filtres à manches qui sont plus représentatifs du parc matériel de dépoussiérage de l'usine.

Chapitre III. Le dépoussiérage et la filtration aux C.D.S

A. Introduction

La filtration est un aspect très présent au sein du processus de fabrication des Ciments Du Sahel S.A. La preuve en est que le nombre de filtres installés est très important, avec une répartition assez équilibrée dans tout le processus de l'usine. Nous constaterons aussi que la gamme de filtres la plus utilisée est celle des filtres avec un nettoyage des manches par jet d'air comprimé. Ces filtres ont donc été insérés pour plusieurs mobiles dont essentiellement la récupération de poussières et le respect des normes environnementales.

B. Les motifs de la filtration

1. La récupération des poussières

Le premier motif de la filtration pour les Ciments Du Sahel S.A., c'est d'éviter la perte de production qui est occasionnée par les émanations de poussières. Libérer près de 6t/h de mélange dans l'atmosphère, c'est sans nul doute perdre pratiquement la même quantité de ciment. Ce sont donc des coûts d'approvisionnement et d'exploitation des machines qui ne seront jamais amortis par cette matière perdue. La récupération de la poussière est donc primordiale et nous pouvons rencontrer dans le milieu industriel des dépoussiéreurs qui ne sont utilisés qu'à cette fin.

Dans cette usine, cette récupération de la production est certes très importante mais c'est une raison qui peut rivaliser avec celle des normes environnementales qui sont aujourd'hui très à la mode.

2. Les normes environnementales

Le dépoussiérage des machines, comme nous l'avons spécifié un peu plus haut, doit satisfaire certaines exigences environnementales. Les normes en vigueur définies par des organisations professionnelles vont dans le sens de la protection du milieu alentour.

L'émission dans l'atmosphère de fumées, poussières, gaz odorants, toxiques ou corrosifs susceptibles d'incommoder le voisinage, de compromettre la santé ou la sécurité publique, de nuire à la production agricole, à la conservation des constructions et monuments ou au caractère des sites est réduite autant que possible.

Tous les postes ou parties d'installations susceptibles d'engendrer des émissions de poussières sont pourvus de moyens de traitement de ces émissions.

Selon ces normes, la valeur limite en poussières des émissions gazeuses en provenance du four ou du broyeur cru est de **50 mg/m³**. En outre, les périodes ininterrompues de pannes ou d'arrêts des dispositifs d'épuration pendant lesquelles les teneurs en poussières des gaz rejetés dépassent **100 mg/m³** doivent être d'une durée continue inférieure à **48 heures** et leur durée cumulée sur une année doit être inférieure à **200 heures**.

En aucun cas, la teneur en poussières des gaz émis ne peut dépasser la valeur de **500 mg/m³**. En cas de dépassement de cette valeur, l'exploitant est tenu de procéder sans délai à l'arrêt de l'installation en cause.

C. Recensement du matériel de filtration de l'usine

Le parc matériel de filtration des Ciments Du Sahel est un ensemble très vaste d'appareillages distincts de par leur fonctionnement et leur utilisation dans le processus de l'usine. Comme nous pourrons le constater, ces dispositifs auront des capacités de charge variant selon les points de dépoussiérage considérés, de l'approvisionnement en matières premières jusqu'à la l'ensachage du ciment. Cependant, nous pouvons déjà retenir que les étapes de traitement les plus concernées sont:

- Le **concassage primaire**,
- Le **broyage de matières** (matières premières, clinker ou charbon),
- Le **four rotatif**,
- L'alimentation des **trémies et silos**...

Au total, dans l'usine, nous répertorions plus de **50** filtres de dépoussiérage en considérant ceux qui ne sont pas mentionnés dans la documentation de l'entreprise. Si nous devons faire une répartition de l'usine en sections (clinker, ciment et charbon), la section clinker contient près de **17 filtres** contre **19** pour la section ciment et **12** pour la section charbon.

Les filtres les plus utilisés sont les filtres à manches de type « jet pulse » mais de constructeurs différents (F.L.Smith pour les sections ciment et clinker, Intensiv Filter pour la section charbon).

Les références de ces filtres donnent des informations sur leurs caractéristiques telles que le nombre de leurs manches.

1. Filtres Jet pulse et d'air inversé de la société FLSmidth

Les dépoussiéreurs à air pulsé sont de conception modulaire. Ils peuvent être classés en plusieurs catégories grâce leur mode d'utilisation et leurs références. Ceux qui sont présents dans la cimenterie sont les filtres de **type IN, CE1, CE2, CEH2 et Filtax D.**

- Les **filtres IN** sont de petites capacités et sont aussi appelés filtres de nuisance du fait qu'ils ne soient utilisés que pour récupérer une faible quantité de poussières. Il n'y a que 4 modèles pour ce type de filtre puisqu'ils ne peuvent être doté que de 36 ou 54 manches, et positionnés verticalement ou horizontalement.

Le tableau suivant les classe selon leur mode de pose et leur nombre de manches.

<i>Référence</i>	<i>Positionnement</i>	<i>Nombres de manches</i>
IN-V36	vertical	36
IN-H36	horizontal	36
IN-V54	vertical	54
IN-H54	horizontal	54

Tableau 2 : Classement des filtres de type IN

- Les **filtres CE1** sont aussi des filtres de nuisance pouvant être composées de un ou plusieurs modules et donc avec des surfaces de filtrage de 24 à 242 m². Ils peuvent être utilisés pour filtrer l'air prélevé d'un ou plusieurs points de dépoussiérage. L'exemple suivant donne l'identification de d'un filtre unitaire c'est-à-dire constitué d'un module: CE1 – 1 – 05. D'après cette référence, le filtre est un filtre CE de type 1 avec 1 module mentionné par le second chiffre et 5 rangées de sacs.

Nous pouvons ci-après considérer le tableau de classification des filtres CE1 disponibles.

<i>Référence</i>	<i>Nombre de rangées de sacs</i>	<i>Nombre de sacs par rangée</i>	<i>Nombre total de sacs</i>	<i>Nombre de modules</i>	<i>Surface de filtrage</i>
CE1-1-03	3	7	21	1	24
CE1-1-04	4	7	28	1	32
CE1-1-05	5	7	35	1	40
CE1-2-06	6	7	42	2	48
CE1-2-08	8	7	56	2	64
CE1-2-10	10	7	70	2	81
CE1-4-06	6	14	84	4	97
CE1-4-08	8	14	112	4	129
CE1-4-10	10	14	140	4	161
CE1-6-12	12	14	168	6	193
CE1-6-15	15	14	210	6	242

Tableau 3: Classement des filtres de type CE1

- Les **filtres CE2** sont des filtres à manches automatiques de mêmes caractéristiques que ceux du type 1 de nuisance mais ayant une surface de filtrage plus grande (de 242 m² à 886 m²).

Ils sont donc constitués au minimum de 6 modules et au maximum de 22 modules. On peut donc avoir 9 types de filtres disponibles de cette catégorie.

Le tableau de classification est le suivant:

<i>Référence</i>	<i>Nombre de rangées de sacs</i>	<i>Nombre de sacs par rangée</i>	<i>Nombre total de sacs</i>	<i>Nombre de modules</i>	<i>Surface de filtrage</i>
CE2-6-15	15	14	210	6	242
CE2-8-20	20	14	280	8	322
CE2-10-25	25	14	350	10	403
CE2-12-30	30	14	420	12	483
CE2-14-35	35	14	490	14	564
CE2-16-40	40	14	560	16	644
CE2-18-45	45	14	630	18	725
CE2-20-50	50	14	700	20	805
CE2-22-55	55	14	770	22	886

Tableau 4: Classement des filtres de type CE2

- Les filtres CEH2, de même que les Filtax D, sont des filtres procédés contrairement aux filtres de nuisance puisqu'ils peuvent être destinés à la récupération de matières. Les caractéristiques et les désignations des filtres CEH sont identiques à celles des précédents filtres centraux CE1 et CE2.

Les filtax de type D sont aussi des filtres automatiques de surface de filtrage variant de 1356 à 4520 m² avec un nombre pair de modules variant de 12 à 40. Il est à noter que chaque module est composé de 50 sacs.

Un de ces filtres référencé D16 – 4,5 – 1808 signifie donc qu'il est composé de 16 modules, chacun composé de 50 sacs de 4,5 m et avec une surface totale de filtrage de 1808 m².

Le tableau suivant nous montre les divers types de Filtax disponibles.

<i>Référence</i>	<i>Nombre de modules</i>	<i>Nombre de rangées de sacs</i>	<i>Nombre total de sacs</i>	<i>Surface de filtrage</i>
D12-4,5-1356	12	60	600	1356
D14-4,5-1586	14	70	700	1586
D16-4,5-1808	16	80	800	1808
D18-4,5-2034	18	90	900	2034
D20-4,5-2260	20	100	1000	2260
D22-4,5-2486	22	110	1100	2486
D24-4,5-2712	24	120	1200	2712
D26-4,5-2938	26	130	1300	2938
D28-4,5-3164	28	140	1400	3164
D30-4,5-3390	30	150	1500	3390
D32-4,5-3616	32	160	1600	3616
D34-4,5-3842	34	170	1700	3842
D36-4,5-4068	36	180	1800	4068
D38-4,5-4294	38	190	1900	4294
D40-4,5-4520	40	200	2000	4520

Tableau 5: Classement des filtres de type Filtax

- Un seul filtre à air inverse est disponible dans l'usine. Ce filtre à manches désigné par 10 BHS 180 est du constructeur Fuller Bulkhandling en coopération avec F.L.Smidth. Il est aussi divisé en compartiments solidaires les unes des autres mais qui sont isolés un à un lors du nettoyage. Le principe de nettoyage est différents des précédents; cette fois-ci, le jet d'air de nettoyage n'est plus de l'air comprimé envoyé par saccade; c'est un ventilateur d'air inverse, continuellement en marche, qui s'en charge. En outre, la poussière ne se colmate plus sur la paroi externe des manches mais plutôt à l'intérieur de celles-ci. Plus loin, nous reviendrons bien plus en détail sur ce filtre.

2. Filtres à manches et en série de la société Intensiv-Filter

Ces filtres, semblables aux Jet Pulse, sont constitués de modules standardisés donc compartimentés. Contrairement aux Jet Pulse, des mesures de sécurité sont intégrées dans son fonctionnement à cause de la nature des poussières traitées. La séparation de ces dernières induisant des charges électrostatiques dans le dispositif, ces mesures de prévention sont d'une importance capitale.

Leur désignation donne toutes les informations nécessaires, notamment sur le nombre de compartiments ou encore la longueur des manches installées.

En effet, un filtre INTENSIV désigné par IFJCC 15 / 1 – 2 signifie:

- IF: Intensiv-Filter
- J: Filtre JET
- C: Injecteur « Coanda »
- C: Combi-Jet
- 15: Nombre de manches par compartiment
- 1: Nombre de compartiments
- 2: Indice de la longueur de la manche (1=1125 ; 2=2250 ; 3=3375 ; 4=4500 ; 5=5325)

Du fait que sa composition est modulaire, il est difficile de donner une liste figée des filtres Intensiv disponibles. Le terme Combi Jet implique que l'assemblage du filtre est fait sur place par l'entreprise usager.

D. Inventaire des filtres du processus de fabrication

Nous avons, plus haut, mentionner les divers types de filtres disponibles auprès des constructeurs ayant installé des appareils de dépoussiérage aux C.D.S. Le tableau érigé à la page suivante met en exergue les filtres réellement installés à divers niveaux du processus de traitement et de fabrication.

Section clinker		Section ciment	
Concassage primaire	CE2-12-30 CE1-6-12	Transport clinker	CE1-2-08 CE1-4-08
Alimentation et stockage ajouts	CE1-6-12 CE1-6-15	Alimentation trémies broyeur ciment	CE1-2-10 CE1-2-08
Alimentation trémies	CE1-4-10 CE1-6-15	Trémies d'alimentation broyeur ciment	CE1-6-15 CE1-2-06
Alimentation broyeur	CE1-6-15 CE1-6-15	Dépoussiérage broyeur	Filtax D12-4,5-1356 CEH2-18-45 CE1-4-10
Broyeur farine crue	CE1-4-10	Transport ciment aux silos	CE1-2-10 CE1-2-06 CE1-1-03 CE1-1-03 CE1-1-03
Transport farine crue	CE1-4-08	Silos ciment	CE1-1-03 CE1-2-10 CE1-2-10
Dépoussiérage du four	CE1-2-10 10BHS180	Ensachage ligne 1	CE2-8-20
Silo clinker fini et alimentation	CE1-2-10 CE1-6-15	Ensachage ligne 2	CE2-8-20
Transport clinker	CE1-6-15	Chargement en vrac	IN-V54
Extraction silo clinker fini	CE1-2-10 CE1-2-10		
Section charbon			
Alimentation et stockage charbon	IFJCC 85(80)/4-4 IFJC 25/1-3 IFJC 50/1-3		
Transport charbon	IFJC 40/1-3 IFJC 40/1-3 IFJC 40/1-3		
Transport charbon brut	IFJC 12/1-2		
Broyeur charbon	IFJCC 85(80)/7-4 IFJC 12/1-2 IFJC 12/1-2		
Transport charbon pulvérisé	IFJC 26/1-2 IFJC 26/1-2		

Tableau 6: Inventaire des filtres de l'usine

E. Conclusion

Comme nous pouvons le constater, un grand nombre de filtres a été introduit dans presque tous les niveaux du processus de l'usine. Presque la totalité de ces filtres ont le même principe de fonctionnement. Le dispositif de dépoussiérage qui attire le plus notre attention est le filtre à air inverse. Dénommé Bag House, ce dernier se démarque justement des autres filtres du fait du principe de fonctionnement lors du tirage mais aussi du système de nettoyage des manches. Dans toute la suite, nous traiterons exclusivement du comportement intrinsèque de ce grand dispositif puis de ses réactions vis-à-vis des systèmes auxquels il est connecté et des méthodes de maintenance qu'il serait possible d'adopter pour optimiser son efficacité.

Chapitre IV. Etude du filtre dépoussiéreur du broyeur de cru et du four

A. Introduction

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le bag house est un système de dépoussiérage de la gamme des filtres à manches. Ce que nous pouvons souligner c'est que, du point de vue macroscopique, la compréhension de son mode de fonctionnement est relativement facile. Cependant, à l'échelle microscopique, certains paramètres tels que les températures et les pressions mènent à des difficultés pour comprendre le dispositif. Ces limites s'accroissent encore plus lorsque le filtre est inséré dans un vaste processus de traitement où les divers éléments le constituant sont en perpétuelle interaction.

C'est pour cette raison que nous nous proposons dans un premier temps d'étudier le bag house isolé de tout autre système. Ensuite, nous observerons son comportement par rapport aux paramètres de marche imposés par les appareils qui forment son environnement direct dans l'usine. La finalité sera de pouvoir comprendre la réaction de ce filtre du point de vue de la quantité de poussières qu'il reçoit en entrée et de la quantité qu'il parvient à récupérer. Il sera dès lors important de trouver les mesures nécessaires pour limiter les émissions de matières mais aussi de savoir réguler le débit de poussières dans les trémies de récupération de poussières

B. Description et étude du fonctionnement automatique

Cette étude consistera d'abord à faire une description globale du système. Nous commencerons par sa donner sa géométrie et ses dimensions avant de mettre en évidence les éléments principaux qui le constituent. Il s'en suivra la détermination de son cycle de fonctionnement mentionné dans la programmation automatique.

1. Structure et principaux éléments de la géométrie

Comme son nom l'indique, le bag house est de manière simple une grande enceinte chaudronnée à l'intérieur de laquelle sont placées des manches qui assurent la filtration.

Pour avoir une véritable vue de l'appareil, il faut considérer qu'il est composé :

- de **10 compartiments** d'environ 5944mm de longueur; 5893mm de largeur et 20981mm de hauteur, ayant chacun à leur base une trémie de profondeur 4643mm et

de surface de base celle des compartiments. Ces chambres contenant les manches sont positionnées suivant deux colonnes distant de 3048mm; ce qui fait qu'elles sont face à face, deux à deux. Ils sont chacun pourvu de deux portes d'inspection: une à la base et une autre en haut.

- d'une **salle d'air propre et d'une salle d'air sale** comprises dans l'espace entre les deux rangées de chambres mentionnées précédemment, la première salle citée étant au-dessus de la seconde. Les deux salles réunies occupent un espace de longueur 29720mm, de largeur 2834mm et de hauteur 7525mm. Elles sont séparées par une cloison formant un angle d'environ 4,1° avec l'horizontal.
- d'un **réseau d'air de retour** inclus, à part les conduites venant du ventilateur, dans la chambre d'air propre et localisé au coin supérieur. Sa longueur est de 29720mm, sa largeur de 800mm et sa hauteur de 1417mm.
- d'une **gaine à l'entrée** débouchant sur la salle d'air sale et **d'une autre** reliée à la salle d'air propre et qui est la sortie du filtre.

2. Eléments actifs et dispositifs indicateurs de paramètres

Au-delà de la structure géométrique, le bag house est constitué d'éléments dont certains font de lui un système très automatisé. Ces derniers jouent des rôles critiques au sein du dispositif et la maîtrise de leur comportement dans le système est capitale.

➤ **Les vannes**

Nous pouvons en dénombrer 21 dont 10 vannes principales du réseau de tirage, 10 vannes d'air inverse pour le nettoyage des manches et 1 vanne de purge. Elles sont toutes commandées par des vérins pneumatiques, eux-mêmes commandés par des électrovannes. L'air comprimé destiné à activer les vérins est délivré à une pression de **80 à 100 livres par pouce carré**.

Ces vannes assurent la communication des chambres avec les ventilateurs d'air. A chaque chambre correspond une vanne d'air principale et une vanne d'air inverse. La première vanne la met en relation avec le ventilateur de tirage lors de la filtration et la seconde avec le ventilateur d'air inversé. Ces deux vannes que nous venons de citer ont un fonctionnement opposé c'est-à-dire qu'au moment où l'une est ouverte, l'autre est

fermée. La vanne de purge ouvre un circuit, à la manière d'un by-pass, pour le ventilateur d'air inversé lorsque ce dernier n'est en communication avec aucune chambre. Dans ce cas, il aspire l'air de la chambre d'air propre et refoule dans ce même endroit en traversant la vanne de purge.

➤ **Les manches**

Ces derniers sont au nombre de 180 par compartiment; ce qui fait un total de 1800 manches dans le dispositif. Les manches installées sont du type tissé en fibre de verre dont les fournisseurs ont d'abord été la société FLSmith puis actuellement la société Filtext. Le diamètre nominal de ces manches est de 305mm et s'agissant des longueurs, elles sont toutes aussi uniformes à l'exception de 10 manches par compartiment. On pourra donc distinguer au total 100 courtes manches de longueur 8230mm et 1700 longues manches de longueur 10820mm.

Ces manches, comme nous avons eu à l'étudier tout au début, constituent l'élément de filtration. La matière provenant de la chambre d'air sale vient se colmater à la paroi interne de ces manches. Grâce au gâteau de poussières qui se forme, l'air est rejeté propre dans l'atmosphère même s'il y a une certaine quantité de matière qui s'échappe.

➤ **Les ventilateurs**

On note la présence de deux ventilateurs dans le fonctionnement du système. L'un est destiné au tirage de l'air à filtrer, l'autre au nettoyage par contre-courant des manches.

- Le **ventilateur principal de tirage**: c'est un ventilateur centrifuge radial, apte au transport de gaz pauvre en poussière et d'air purifié, du constructeur Venti Oelde et de référence **DHRV 68 – 1600 / K**. En guise de rappel, notons que ce type de ventilateur comporte une roue à aubes qui renvoie l'air amené axialement en direction radiale. Le courant d'air va subir à partir de ce moment une accélération pour acquérir de l'énergie cinétique. Après avoir traversé la roue, il rentre dans un carter en forme de spirale que l'on peut considérer comme un diffuseur. La finalité de ce changement de section est la transformation de l'énergie cinétique tantôt mentionnée en énergie de pression.

Le type de construction de ventilateur est le type « K » du fait que la roue à aubes est montée sur un arbre à deux supports. Le gaz est susceptible d'entrer dans la roue

par les côtés, ce qui fait que nous avons au total deux manchettes ou conduites d'aspiration et une de refoulement.

Ce ventilateur est responsable du phénomène d'amenée de la matière au niveau du Baghouse. Il met ce dernier sous l'influence d'une pression négative et permet d'avoir la pression dynamique nécessaire pour favoriser le transport des particules et éviter le colmatage des conduites. Son entraînement est assuré par un moteur à vitesse variable et son fonctionnement est conditionné et régulé par la valeur de pression (2,5 mbar) à la sortie du ventilateur du four rotatif.

- Le **ventilateur d'air inverse**: c'est un ventilateur centrifuge commercialisé par la société Howden Buffalo INC. Le principe de fonctionnement est le même que précédemment avec des puissances mises en jeu bien inférieures. Il est à simple entrée et est entraîné par un moteur de 93,3kW.

Le rôle de ce ventilateur est d'assurer la fonction de nettoyage des manches. En effet, lorsque ces dernières sont suffisamment colmatées au niveau d'une chambre, la vanne d'air inversé s'ouvre et la vanne de purge se ferme (après avoir déjà isolé la chambre par la fermeture de la vanne d'air principale). Le ventilateur souffle donc l'air de la chambre d'air propre dans la chambre dans un sens de flux inverse que le ventilateur d'air principale.

La pression appliquée par le ventilateur peut être modifiée grâce à un volet placé à sa conduite de refoulement.

➤ **Les jauges de pression différentielle**

Ces appareils ne sont que des indicateurs de la pression différentielle à travers les manches de chaque compartiment et à travers tout le filtre du collecteur d'entrée à celui de sortie. Ils n'ont cependant aucune capacité de contrôler les équipements.

Ces jauges ne peuvent prendre en charge que des pressions en dessous de 2,5 kPa.

➤ **Les modules de chauffage**

Ces modules sont de la Compagnie Thermon Manufacturing. Ils sont au nombre de 13 et sont placés sur les parois de chaque trémie avec des puissances calorifiques diverses. La puissance totale est toutefois de 11,7 kW pour chacune de ces trémies avec une alimentation électrique de 400V en triphasé.

Ils sont installés pour maintenir une certaine température (avoisinant 150 à 180°C) dans les trémies et ainsi réduire les possibilités de colmatage de leurs parois.

➤ **Le panneau de contrôle des températures**

Ce module de contrôle **TC 365c** est du même fabricant que les modules de chauffage et permet de juste de connaître la température instantanée au niveau de chaque trémie du filtre. La plage de contrôle est située entre -51°C et 500°C.

3. Principe de fonctionnement du système

Ce filtre à manche est non seulement le plus grand de l'usine mais aussi le plus automatisé. Son principe de fonctionnement est relativement facile à comprendre et est commandé par un automate programmable industriel. Le programme qui fait tourner la machine est un programme séquentiel élaboré en grafcet dans lequel le cycle de nettoyage occupe une grande partie.

Ce qui suit décrit l'algorithme du programme sans pour autant entrer dans le détail des temps de cycle. Il faut préciser que les ventilateurs de tirage et d'air inverse sont en perpétuel fonctionnement au cours du cycle.

a) **Marche en mode filtration**

Au début, tous les 10 compartiments du filtre sont en communication directe avec le ventilateur principale de tirage. A ce moment, toutes les vannes d'air principales sont ouvertes et toutes les vannes d'air inverse sont fermées. L'air chargé de poussières pénètre le collecteur d'entrée et rentre dans les trémies des chambres en passant par la chambre d'air sale. Il pénètre à l'intérieur des manches et tente de rejoindre la salle d'air propre. C'est là que s'effectue la filtration par le gâteau de poussières qui s'est formé au préalable ; les particules suffisamment grossières se colmatent sur la paroi interne des manches et l'air s'échappe vers la salle d'air propre, puis le collecteur de sortie et enfin vers la cheminée. Durant tout ce temps, le ventilateur d'air reverse tire à partir de la salle d'air propre mais est obligé de refoulé dans le même lieu grâce à la vanne de purge qui assure cette boucle fermée.

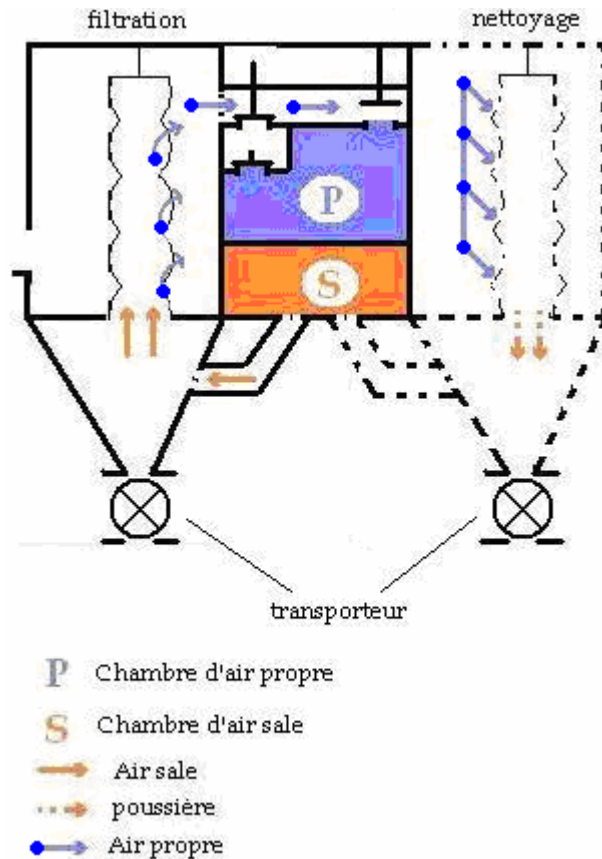


Figure 5: Schéma d'une chambre en filtration

b) Marche en mode nettoyage

En mode filtration, nous devinons assez aisément que les manches ont un seuil de colmatage. A un moment donné, il sera nécessaire d'évacuer la matière au niveau des sacs remplis pour éviter le bourrage. Cette opération est faite pour une chambre à la fois et peut s'effectuer systématiquement de façon périodique ou en surveillant une certaine valeur de la chute de pression à travers les manches. La méthode utilisée aux C.D.S. est le déclenchement périodique du décolmatage. Le mode nettoyage n'implique certainement pas l'arrêt du mode filtration. Au contraire cette procédure continue mais sauf pour le compartiment à nettoyer qui doit être désormais isolé. Pour ce faire sa vanne d'air principale se ferme et aussitôt sa vanne d'air inverse s'ouvre en même temps que la vanne de purge se ferme. Cette chambre communique dès lors directement avec le ventilateur d'air inverse qui y rejette l'air pris de la salle d'air propre. Dès l'entrée de ce flux d'air à écoulement inverse par rapport au précédent, les manches sont secouées et une partie de la matière colmatée descend au fond des trémies. Après un certain temps, la vanne d'air inverse se ferme en même temps que la vanne de purge s'ouvre pour la boucle fermée du

ventilateur d'air inverse. La vanne d'air principale s'ouvre et la chambre adhère à nouveau au mode filtration afin qu'un autre compartiment puisse activer son mode nettoyage et ainsi de suite.

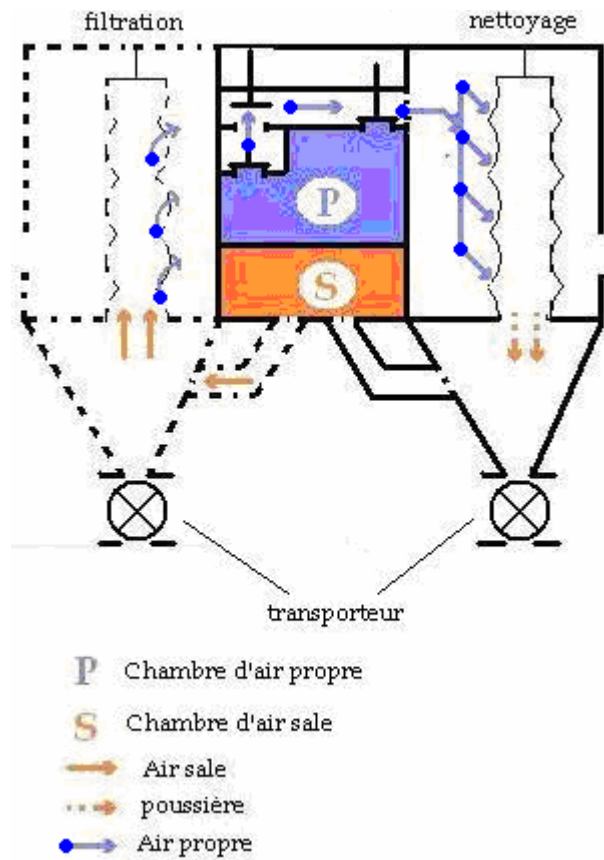


Figure 6: Schéma d'une chambre en nettoyage

Le Schéma de la page suivante décrit les modes de marche évoqués ci-dessus. Contrairement aux deux premiers, ce dessin, qui n'est qu'une représentation du principe de fonctionnement et non de l'allure géométrique réelle, montre l'action des ventilateurs de tirage et d'air inverse responsable de la filtration et du nettoyage des manches.

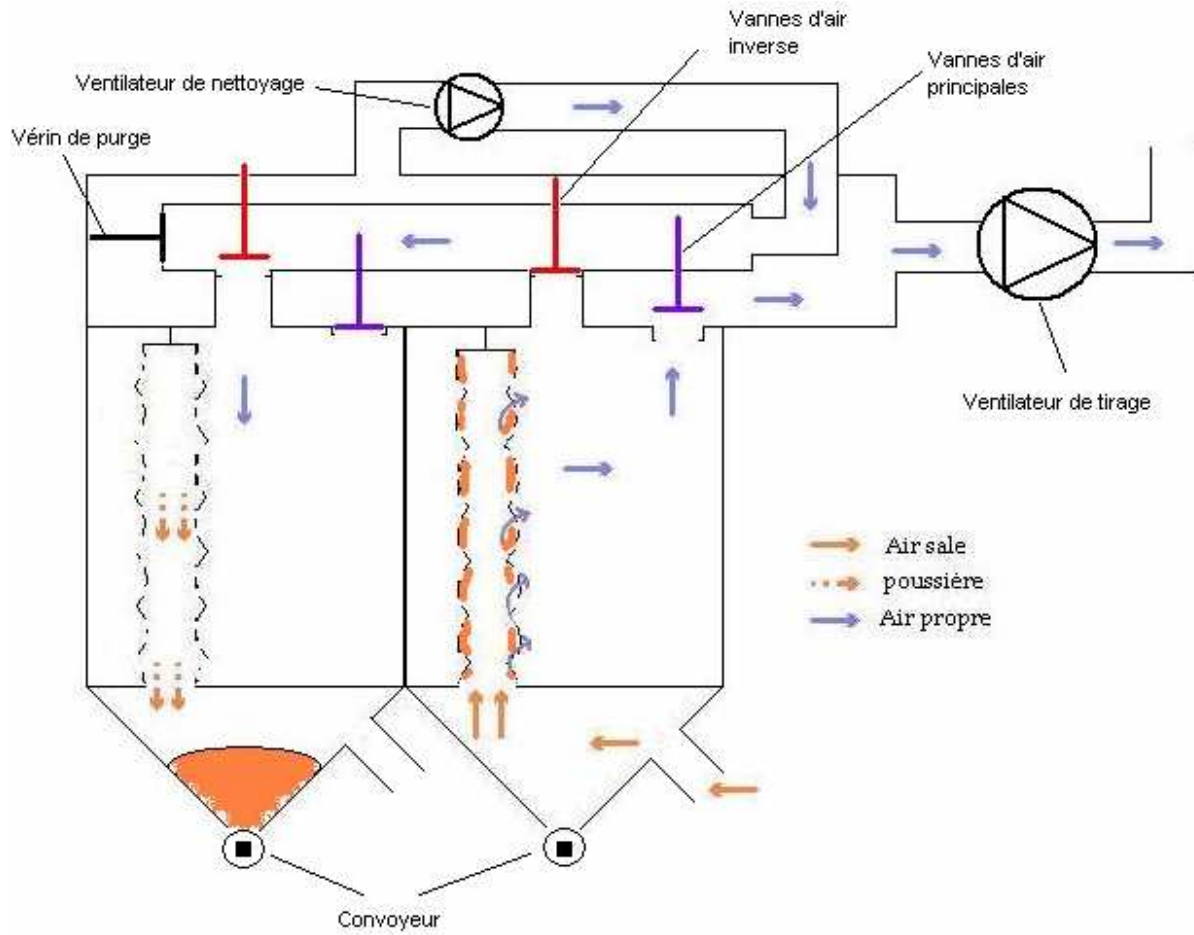


Figure 7: Schéma de principe du tirage et du nettoyage

C. Etude du réseau aéraulique

La conception et le dimensionnement d'un filtre à manches se font bien évidemment d'après les concepts de la mécanique des fluides en considérant les données fournies par son futur utilisateur ou son constructeur lui-même.

En hydraulique, l'hypothèse de fluides incompressibles est la base de tout calcul. Toutefois, quand il s'agit d'aéraulique, les relations utilisées sont identiques même si cette hypothèse est erronée.

Nous présenterons dans cette partie, tout d'abord les généralités en matière de réseau aéraulique puis viendra l'étude proprement dite du cas du Bag House.

1. Généralités sur les réseaux aérauliques

a) Ecoulement en conduite

Dans ce domaine, les relations de base sont issues de la mécanique des fluides à partir des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Elles aboutissent à des relations entre les pressions, les vitesses et les températures.

Ce sont les célèbres équations :

- D'Euler pour l'écoulement de fluide parfait et ;
- De Navier-Stokes pour l'écoulement de fluides newtoniens ou réels.

Cependant ces relations locales restent très difficiles ; c'est pour cette raison que des hypothèses simplificatrices sont mises en jeu. D'autres types d'équations sont donc générés à partir de ce moment telle que l'Equation de Bernoulli utilisée en hydraulique.

(1) Equation de Bernoulli généralisée

L'équation de Bernoulli découle directement des deux principes de la thermodynamique, eux-mêmes en relation avec les équations de Navier-Stokes. Dans un réseau aéraulique, on peut être confronté à des changements de section et donc de vitesses d'écoulement, à des variations d'altitude et de direction. Considérons le schéma illustratif suivant :

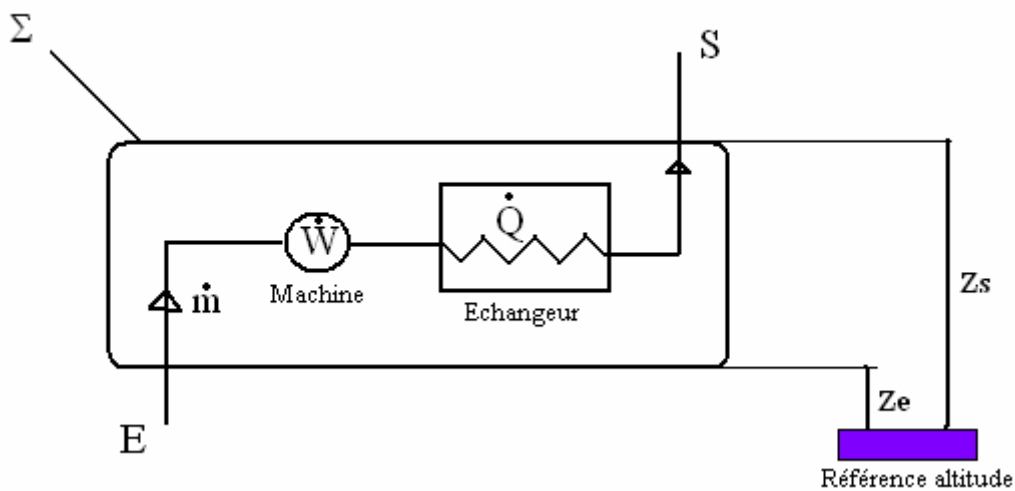


Figure 8: Illustration d'un circuit aéraulique élémentaire

Ce sont ces paramètres qui sont mis en exergue dans les deux équations suivantes en appliquant les 2 principes sur Σ . On obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dE_t}{dt} = \dot{Q} + \dot{W} + \dot{m} \cdot \left[(h_e - h_s) + \frac{V_E^2 - V_S^2}{2} + g \cdot (z_e - z_s) \right] \\ \frac{dS}{dt} = \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{m} \cdot (S_E - S_S) + P(S) \end{array} \right. \quad [1]$$

Pour simplifier ce système d'équations, il nous faut prendre en compte la nature du corps qui est l'air considéré comme un corps pur. En outre, du fait du régime permanent que nous considérerons lors de l'étude ultérieure du dispositif, nous obtenons :

- $\frac{dE}{dt} = \frac{dS}{dt} = 0$ grâce à l'hypothèse du régime permanent
- Pour un corps, les variations d'enthalpie et d'entropie, d'après les lois thermodynamiques, sont de la forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} dh = c_p \cdot dT + \left[v - T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \right] \cdot dP \\ ds = c_p \cdot \frac{dT}{T} - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_P \cdot dP \end{array} \right. \quad [2]$$

Et du fait de l'incompressibilité admise bien qu'erronée, on a :

$$\frac{\partial v}{\partial T} = 0 \longrightarrow \left\{ \begin{array}{l} dh = c_p \cdot dT + v \cdot dP \\ ds = c_p \cdot \frac{dT}{T} \end{array} \right. \quad [3]$$

Ces deux points nous permettent d'aboutir aux simplifications suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q} + \dot{W} + \dot{m} \cdot \left[c_p \cdot \Delta T + v \cdot \Delta P + \frac{V_E^2 - V_S^2}{2} + g \cdot (z_E - z_S) \right] = 0 \\ \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{m} \cdot c_p \ln \frac{T_E}{T_S} + P(S) = 0 \end{array} \right. \quad [4]$$

Le système d'équations que nous venons d'obtenir peut encore être simplifié en considérant deux cas de figure :

Ecoulement isotherme donc sans échange de chaleur :

Dans ce cas, $T_E = T_S$ donc [4] donne :

$$\begin{cases} \dot{Q} + \dot{W} + \dot{m} \cdot \left[v \cdot \Delta P + \frac{V_E^2 - V_S^2}{2} + g \cdot (z_E - z_S) \right] = 0 \\ \dot{Q} = -T \cdot P(S) \end{cases} \quad [5]$$

Il faut souligner ici que l'écoulement isotherme implique un échange de chaleur avec l'extérieur. En fait, l'expérience montre qu'un fluide circulant dans une boucle fermée s'échauffe même en l'absence d'un dispositif de chauffage. C'est le travail des forces de frottements internes $T \cdot P(S)$ qui impliquent cet échauffement.

La température se stabilise à une température $T_{\text{fluide}} > T_{\text{ambiant}}$ permettant l'évacuation de cette chaleur créée (non compensée) vers l'extérieur. On regroupe en général le 1er et le 2nd principe en une seule équation en faisant apparaître la masse volumique du fluide $\rho = 1/v$.

A partir du système [5], on a :

$$\dot{W} - T \cdot P(S) = \dot{m} \cdot \left[\frac{(P_S - P_E)}{\rho} + \frac{V_S^2 - V_E^2}{2} + g \cdot (z_S - z_E) \right] \quad [6]$$

Où \dot{W} est la puissance mécanique échangée avec l'extérieur

$T \cdot P(S)$ est la puissance des forces de frottement dissipée au sein du fluide.

En divisant par le débit masse et en multipliant par la masse volumique, on retrouve la forme habituelle de l'équation de Bernoulli en expression de pression avec un regroupement relatif à l'entrée et à la sortie :

$$\rho W + \rho T f = \left(P_S + \rho \frac{V_S^2}{2} + \rho g \cdot z_S \right) - \left(P_E + \rho \frac{V_E^2}{2} + \rho g \cdot z_E \right) = \Delta P_m - \Delta P_f \quad [7]$$

Avec $T f$ = Travail des forces de frottement

On reconnaît dès lors :

- La pression totale : $P_t = P + \rho \frac{V^2}{2} + \rho g \cdot z$
- La pression motrice : $P^* = P + \rho g \cdot z$
- La pression dynamique : $P_d = \rho \frac{V^2}{2}$
- La pression d'arrêt : $P_a = P + \rho \frac{V^2}{2}$
- La différence de pression induite par la machine : ΔP_m
- Les pertes de charge exprimées en Pascal : ΔP_f

Pour avoir les expressions de cette équation [7] en hauteur manométrique, il suffira de faire la division de cette égalité par le poids spécifique $\gamma = \rho \cdot g$ pour trouver :

$$\left(\frac{P_S}{\gamma} + \frac{V_S^2}{2g} + z_S \right) - \left(\frac{P_E}{\gamma} + \frac{V_E^2}{2g} + z_E \right) = \Delta H_m - \Delta H_f$$

- La charge hydraulique : $H = \frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + z$
- La hauteur piézométrique de la machine : $H^* = \frac{P}{\gamma} + z$
- La hauteur manométrique de la machine : ΔH_m
- La perte de charge en mètre : ΔH_f

Remarques:

a) Dans le cas où il n'y a pas de pertes de charge ($\Delta H_f = 0$), on retrouve l'équation de Bernoulli classique, valide dans le cas des fluides parfaits (non visqueux).

b) Dans le cas où il n'y a ni pertes de charge, ni échange d'énergie mécanique, on retrouve l'équation de l'hydrostatique (fluide au repos).

La figure suivante montre l'évolution des paramètres de l'équation [7] lors de la traversée du réseau.

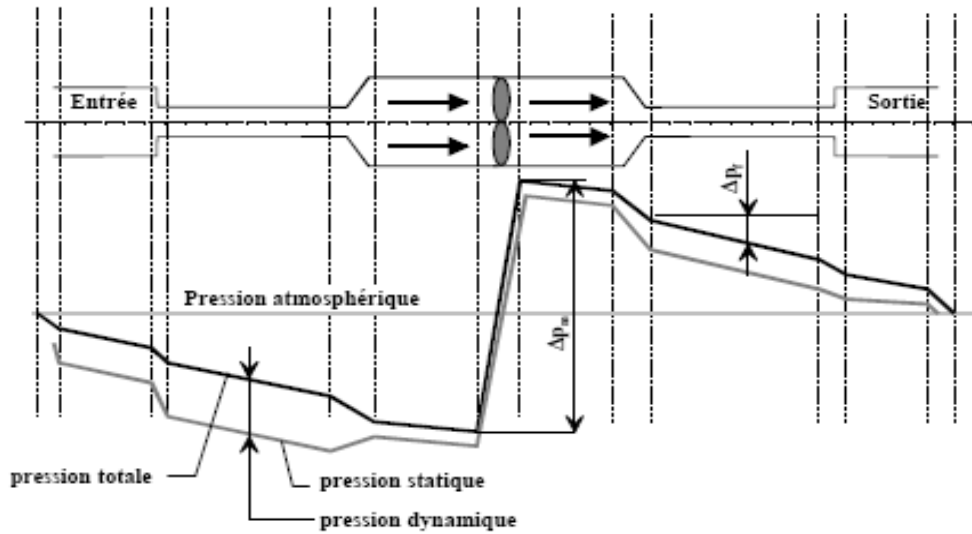


Figure 9: Variation des pressions tout le long du réseau

Présence d'un échangeur ou température non uniforme :

La difficulté avec ce cas de figure, c'est l'utilisation nécessaire des équations locales. On simplifie néanmoins le problème en subdivisant le système en tronçons isothermes. Donc, dans le cas d'un échangeur de chaleur qui transforme le fluide de l'état 1 à l'état 2, on remplacera cette transformation réelle au niveau de l'échangeur (12) (sans dénivellation ni travail mécanique) en :

- Chauffage isobare (11') :

$$\begin{cases} \dot{Q}_{11'} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{1'} - T_1) = \dot{m} \cdot \Delta h_{11'} \\ P(S)_{11'} = -\frac{\dot{Q}_{11'}}{T} + \dot{m} \cdot c_p \ln \frac{T_{1'}}{T_1} = -\frac{\dot{Q}_{11'}}{T} + \dot{m} \cdot \Delta S_{11'} \end{cases} \quad [8]$$

- Détente isotherme (1'2) du fluide incompressible de masse volumique moyenne ρ_m :

$$\begin{cases} \dot{Q}_{1'2} = \dot{m} \cdot \Delta h_{21'} = \dot{m} \cdot \frac{(P_1 - P_2)}{\rho_m} \\ P(S)_{1'2} = -\frac{\dot{Q}_{1'2}}{T} \end{cases} \quad [9] \quad \text{Où } \rho_m = \frac{\rho_1 + \rho_{1'}}{2}$$

En intégrant [8] et [9] dans le bilan global [4] en omettant le terme de la puissance mécanique W, on a :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{12} + \dot{m} \cdot \left[(h_1 - h_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g \cdot (z_1 - z_2) \right] = 0 \\ \frac{\dot{Q}_{12}}{T} + \dot{m} \cdot (s_1 - s_2) + P(S) = 0 \end{array} \right. \quad \text{et alors :}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{11} + \dot{Q}_{1'2} + \dot{m} \cdot \left[(h_1 - h_{1'} + h_{1'} - h_2) + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g \cdot (z_1 - z_2) \right] = 0 \\ \frac{\dot{Q}_{11} + \dot{Q}_{1'2}}{T} + \dot{m} \cdot (s_1 - s_{1'} + s_{1'} - s_2) + P(S)_{11} + P(S)_{1'2} = 0 \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{11} + \dot{m} \cdot (h_1 - h_{1'}) + \dot{Q}_{1'2} + \dot{m} \cdot (h_{1'} - h_2) + \dot{m} \cdot \left[\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g \cdot (z_1 - z_2) \right] = 0 \\ \frac{\dot{Q}_{11} + \dot{Q}_{1'2}}{T} + \dot{m} \cdot (s_1 - s_{1'} + s_{1'} - s_2) + P(S)_{11} + P(S)_{1'2} = 0 \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{1'2} + \dot{m} \cdot \frac{(P_{1'} - P_2)}{\rho_m} + \dot{m} \cdot \left[\frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g \cdot (z_1 - z_2) \right] = 0 \\ \left[\frac{\dot{Q}_{11'}}{T} + \dot{m} \cdot (s_1 - s_{1'}) + P(S)_{11'} \right] + \left[\frac{\dot{Q}_{1'2}}{T} + \dot{m} \cdot (s_{1'} - s_2) + P(S)_{1'2} \right] = 0 \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \dot{Q}_{1'2} + \dot{m} \cdot \left[\frac{(P_{1'} - P_2)}{\rho_m} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g \cdot (z_1 - z_2) \right] = 0 \\ \frac{\dot{Q}_{1'2}}{T} + P(S)_{1'2} = 0 \end{array} \right.$$

En regroupant les 2 équations de ce système on trouve finalement :

$$\left[\frac{(P_{1'} - P_2)}{\rho_m} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} + g \cdot (z_1 - z_2) \right] = \frac{T \cdot P(S)_{1'2}}{\dot{m}} = - \frac{T \cdot P(S)_{21'}}{\dot{m}} = Tf \quad [10] \quad \text{Puisque } P_1 = P_{1'}$$

(2) Mesure de débit : le tube de Pitot

Principe :

On considère le montage de la figure suivante, constitué de tubes T_A et T_B.

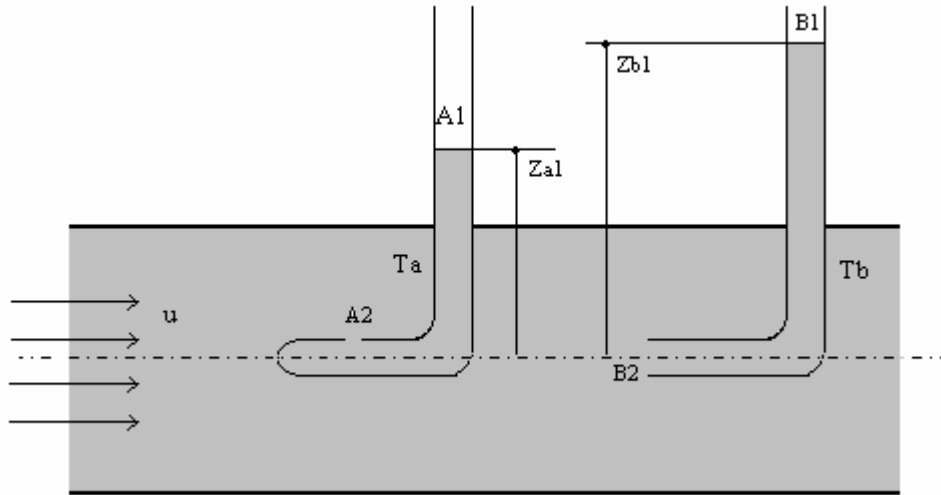


Figure 10: Principe de mesure des pressions statique et dynamique

En appliquant l'équation classique de Bernoulli et en remarquant que :

$$\begin{cases} u_{A1} = u_{B1} = u_{A2} = 0 \\ P_{A1} = P_{B1} = P_0 \\ P_{A2} = P_{B2} = P \end{cases}$$

P_0 étant la pression atmosphérique ;

P la pression statique dans la veine fluide.

Il vient :

- Tube A : $Z_{A2} + \frac{P}{\rho g} = Z_{A1} + \frac{P_0}{\rho g}$ [11]

- Tube B : $Z_{B2} + \frac{P}{\rho g} + \frac{u_{B2}^2}{2g} = Z_{B1} + \frac{P_0}{\rho g}$ [12]

En posant $Z_{A2} = Z_{B2} = 0$ si le référentiel est dans l'axe de la conduite, nous pouvons avoir à partir du tube A la pression statique P et à partir du tube B la pression d'arrêt P_a .

Donc :
$$\begin{cases} P_a = P + \rho \frac{u^2}{2} = \rho \cdot g \cdot Z_{B1} + P_0 \\ P = \rho \cdot g \cdot Z_{A1} + P_0 \end{cases}$$
 [13]

En outre, en soustrayant les équations [11] et [12], on a : $\frac{u_{B2}^2}{2g} = Z_{B1} - Z_{A1}$ [14]

Ce qui permet d'avoir l'expression de la pression dynamique en fonction de Z_{B1} et Z_{A1} :

$$P_d = \rho \frac{u^2}{2} = \rho \cdot g \cdot (Z_{B1} - Z_{A1})$$
 [15]

Cette relation [15] permet de remonter au débit volumique Q si la vitesse est uniforme dans toute la section de la conduite.

$$Q = u \cdot S = S \cdot \sqrt{2g \cdot (Z_{B1} - Z_{A1})} \quad [16]$$

Cependant, pour des pressions assez élevées, nous pouvons constater qu'il sera très difficile de les mesurer avec un tel dispositif. Pour mesurer par exemple une pression de 2 bars donc 10mCE, le fluide circulant dans le manomètre ne sera certainement pas de l'eau. Dans ce cas, on prendra, comme fluide auxiliaire, un fluide dont la masse volumique est beaucoup plus élevée comme le mercure (13600 kg/m^3). On utilise en pratique des tubes en U pour éviter l'incertitude dans le repérage des points de référence tels que le centre de la conduite.

En pratique, nous avons le dispositif représenté dans la figure suivante :

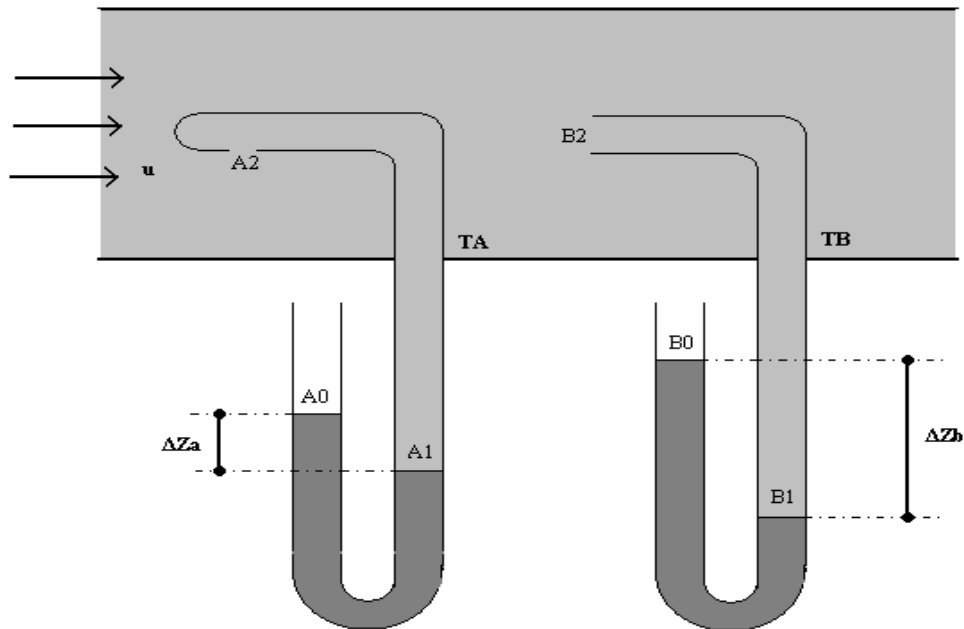


Figure 11: Principe pratique de mesure

De même que précédemment, nous allons appliquer l'équation de Bernoulli pour les tubes T_A et T_B .

$$\bullet \text{ Tube A : } \begin{cases} Z_{A2} + \frac{P}{\rho_{fl} \cdot g} = Z_{A1} + \frac{P_{A1}}{\rho_{fl} \cdot g} \\ Z_{A1} + \frac{P_{A1}}{\rho_{aux} \cdot g} = Z_{A0} + \frac{P_0}{\rho_{aux} \cdot g} \end{cases} \quad [17]$$

$$\bullet \text{ Tube B : } \begin{cases} Z_{B2} + \frac{P}{\rho_{fl} \cdot g} + \frac{u_{B2}^2}{2 \cdot g} = Z_{B1} + \frac{P_{B1}}{\rho_{fl} \cdot g} \\ Z_{B1} + \frac{P_{B1}}{\rho_{aux} \cdot g} = Z_{B0} + \frac{P_0}{\rho_{aux} \cdot g} \end{cases} \quad [18]$$

En combinant les équations de ces deux systèmes, on trouve :

$$\Delta Z_A = Z_{A0} - Z_{A1} = \frac{P_{A1} - P_0}{\rho_{aux} \cdot g} = \frac{P + \rho_{fl} \cdot g \cdot (Z_{A2} - Z_{A1}) - P_0}{\rho_{aux} \cdot g} = \frac{P - P_0}{\rho_{aux} \cdot g} + \frac{\rho_{fl}}{\rho_{aux}} \cdot (Z_{A2} - Z_{A1}) \quad [19]$$

$$\begin{aligned} \Delta Z_B = Z_{B0} - Z_{B1} &= \frac{P_{B1} - P_0}{\rho_{aux} \cdot g} = \frac{P + \rho_{fl} \frac{u_{B2}^2}{2} + \rho_{fl} \cdot g \cdot (Z_{B2} - Z_{B1}) - P_0}{\rho_{aux} \cdot g} \\ &= \frac{\left(P + \rho_{fl} \frac{u_{B2}^2}{2} \right) - P_0}{\rho_{aux} \cdot g} + \frac{\rho_{fl}}{\rho_{aux}} \cdot (Z_{B2} - Z_{B1}) \end{aligned} \quad [20]$$

En règle général, les termes $\frac{\rho_{fl}}{\rho_{aux}} \cdot (Z_2 - Z_1)$ sont négligeables devant les ΔZ puisque les colonnes de fluides présent dans les tubes sont elles-mêmes négligées du fait de leur masse volumiques. Finalement nous avons les expressions de la pression statique P et de la pression d'arrêt Pa dans la veine fluide :

$$P = P_0 + \rho_{aux} \cdot g \cdot \Delta Z_A \quad [21]$$

$$P_a = \left(P + \rho_{fl} \frac{u_{B2}^2}{2} \right) = P_0 + \rho_{aux} \cdot g \cdot \Delta Z_B \quad [22]$$

On peut déduire l'expression de la pression dynamique à partir de ces expressions :

$$P_d = P_a - P = \rho_{fl} \frac{u^2}{2} = \rho_{aux} \cdot g \cdot (\Delta Z_B - \Delta Z_A) \quad [23]$$

$$\text{La vitesse } u \text{ est donc : } u^2 = \sqrt{2 \cdot \frac{\rho_{aux}}{\rho_{fl}} \cdot g \cdot (\Delta Z_B - \Delta Z_A)} \quad [24]$$

Elle permettra de calculer le débit connaissant la section de la conduite.

Le schéma de la page suivante illustre l'allure du dispositif qui utilise ces principes de mesure de pression : le tube de Pitot.

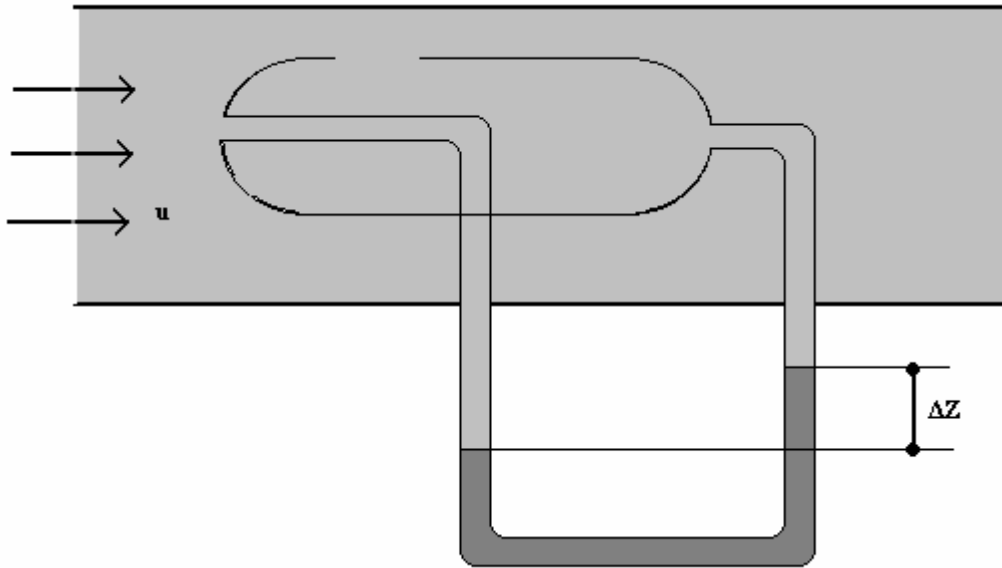


Figure 12: Principe du tube de Pitot

(3) Ecoulement de fluides réels : pertes de charges

Dans toute la suite, nous considérerons que nous avons atteint le régime établi de l'écoulement du fluide : le profil de vitesse ne dépend plus de l'axe de la conduite. A chaque fois que ce profil de vitesse est altéré par un élément du circuit (vanne, échangeur, élargissement ou rétrécissement de conduite...), il devra se rétablir et donc créer ce que l'on appelle une perte de charge singulière. Contrairement à la perte de charge singulière, la perte de charge régulière est aussi fonction des caractéristiques du fluide, plus précisément de sa viscosité. Elle est en outre directement proportionnelle à la longueur de la conduite. En revenant à l'équation de Bernoulli appliquée à un tronçon de réseau ne contenant pas de machine, source ou puits d'énergie, nous avons :

$$\left(\frac{P_S}{\gamma} + \frac{V_S^2}{2g} + z_S \right) - \left(\frac{P_E}{\gamma} + \frac{V_E^2}{2g} + z_E \right) = H_S - H_E = -\Delta H \quad [25]$$

ΔH est la perte de charge et, son équivalent en pression est $\rho g \Delta H = \Delta P_t$, correspondant à la perte de pression totale.

❖ Pertes de charge régulières

Par l'analyse dimensionnelle, on peut montrer que les pertes de charge régulières sont directement proportionnelles à la vitesse moyenne de l'écoulement qui se déduit du débit car $Q = V.S$

On a pu trouver que : avec $\frac{\Delta P_t}{\Delta L} = \frac{\lambda(\text{Re}, \varepsilon_r)}{D} \cdot \rho \frac{u^2}{2}$ [26]

$\frac{\Delta P_t}{\Delta L}$: Pertes de charge régulières ou linéaires en Pa/m

λ : Coefficient de pertes de charge

Re : Nombre de Reynolds

ε_r : Rugosité relative

u : Vitesse moyenne dans la conduite (m/s)

ρ : Masse volumique du fluide (kg/m³)

Sauf pour un avant projet, en général la seule inconnue dans cette expression est λ dépendant du nombre de Reynolds du fluide et de la rugosité de la conduite.

Dans le cas de réseau industriels, on peut considérer dès maintenant que le régime est turbulent. Nous pouvons obtenir λ analytiquement par la formule de Colebrooke ou à l'aide d'un diagramme par l'abaque de Moody. Dans tous les cas, nous serons amenés à faire des itérations du fait de la relation d'interdépendance qui existe entre les divers paramètres.

La formule de Colebrooke est donnée par :

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \cdot \log_{10} \left(\frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} + \frac{\varepsilon_r}{3,71} \right) \quad [27]$$

❖ Pertes de charge singulières

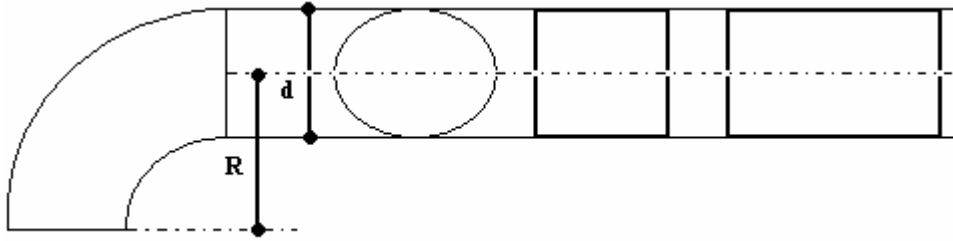
Les pertes de charges singulières, comme celles régulières, ont une expression analytique directement proportionnelle à la vitesse moyenne de l'écoulement.

$$\Delta P = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{u^2}{2} \quad [28]$$

Ce facteur ζ est fonction de la nature de l'élément constituant la perte de charge. C'est en général le constructeur qui en donne la valeur mais des diagrammes normalisés dans des ouvrages spécialisés permettent de la déterminer.

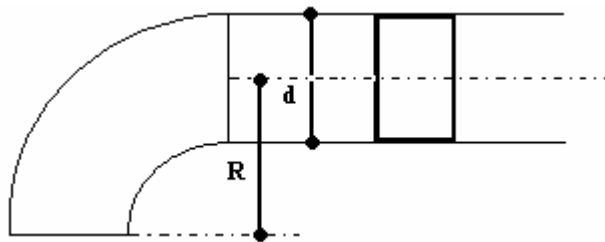
Voici quelques exemples de valeurs pour des types de conduites bien déterminés :

- pour un coude à 90°, arrondis à section circulaire, carré ou rectangulaire à grand côté perpendiculaire au rayon de courbure :



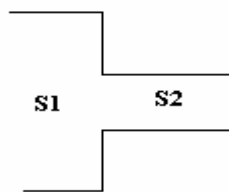
R/d	0,5	0,75	1	1,5	2
ζ	1	0,45	0,30	0,20	0,20

- pour un coude à 90°, arrondis à section rectangulaire à grand côté suivant le rayon de courbure



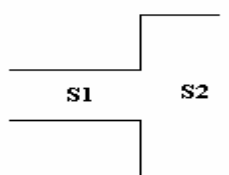
R/d	0,5	0,75	1	1,5	2
ζ	1,5	0,7	0,45	0,30	0,30

- pour un élargissement brusque en ligne droite



$$\zeta = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$$

- pour un rétrécissement brusque en ligne droite



$$\zeta = 0,5$$

b) Ventilateurs centrifuges

En règle générale, les ventilateurs sont les organes moteurs dans un système aéraulique. Il en existe divers types dont les ventilateurs axiaux ou encore centrifuges qui font ici l'objet de notre étude.

(1) Description

Un ventilateur centrifuge comprend plusieurs éléments dont certains peuvent être facultatifs.

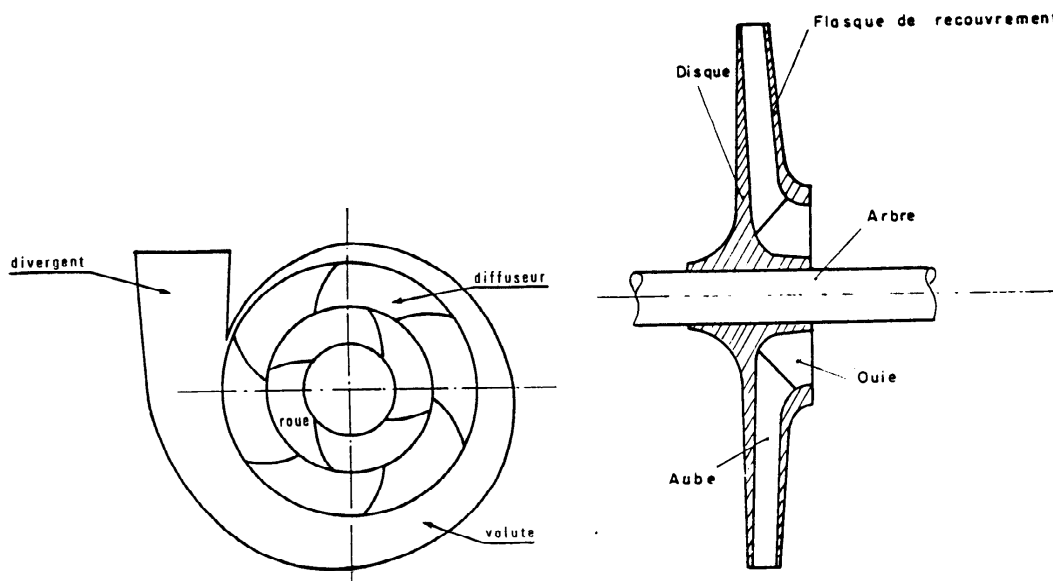


Figure 13: Schéma d'une roue de ventilateur centrifuge

Nous avons d'après la figure ci-dessus :

- **La roue** qui est accouplé à l'arbre du moteur et transmet l'énergie cinétique nécessaire au fluide à transporter,
- **Le diffuseur** qui n'est pas forcément indispensable dans le dispositif mais pourrait permettre de transformer à la sortie de la roue une partie de l'énergie cinétique en énergie potentielle de pression.
- **La volute** permet la récupération du fluide en mouvement de rotation à la sortie du diffuseur et fait office de guidage (mouvement de translation) vers la sortie de la machine.
- **Le divergent** est placé à la sortie de la machine et permet à l'instar du diffuseur de transformer l'énergie cinétique en énergie de pression pour minimiser les pertes de charge dans les canalisations.

(2) Les caractéristiques d'un ventilateur centrifuge réel

L'étude théorique de ce type de machine fait ressortir des paramètres en relation avec l'équation d'Euler pour les turbomachines que nous ne traiterons pas dans ce document.

Cependant, nous pouvons retenir la caractéristique des ventilateurs réels est bien différente de celle des idéaux. Cela est dû aux chocs, aux frottements, au nombre d'aubes de la roue, aux fuites à l'aspiration comme au refoulement. Les courbes de la hauteur manométrique (H_{mt}), de la puissance (P) et du rendement (η) en fonction du débit (Q) sont bien souvent données par le constructeur. Il est très important de les détenir pour pouvoir approcher au maximum les exigences du cahier de charges et du coût le plus économique de la consommation énergétique du ventilateur. La figure suivante représente la forme habituelle des caractéristiques en fonction du débit Q .

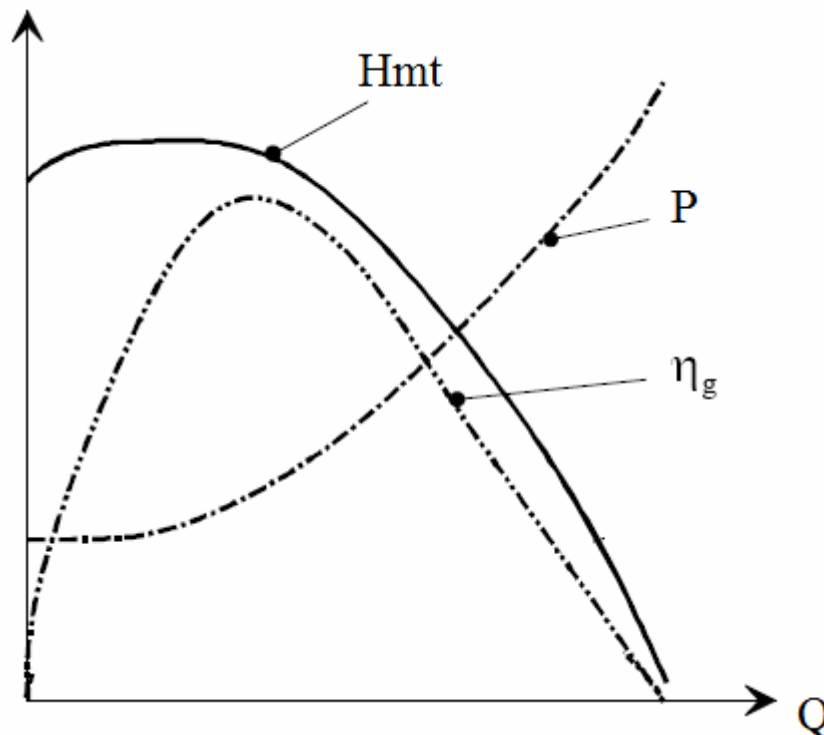


Figure 14: Caractéristiques d'un ventilateur centrifuge réel

2. Réseaux aérauliques du Baghouse

Le filtre à manches Baghouse, dont nous avons tantôt donné un descriptif de sa constitution et de son mode fonctionnement, peut aussi être considéré comme un système à l'intérieur d'un vaste réseau aéraulique. Le comportement du Baghouse dépend en majeure partie de son environnement. En effet, puisqu'il est le filtre dépoussiéreur du four et du broyeur vertical de

cru de l'usine, les paramètres de marche de ces dernières influent grandement sur les débits enregistrés dans ses canalisations et sur la puissance absorbée par le ventilateur de tirage.

L'objectif dans cette partie sera donc de trouver les divers points de fonctionnement du réseau par rapport aux comportements des divers dispositifs qui le constituent.

Comme nous avons pu le constater, nous avons en réalité deux réseaux aérauliques à étudier qui correspondent aux modes de fonctionnement du dispositif. Il s'agit, dans un premier temps, du réseau de tirage qui est le plus grand et que nous venons juste d'expliquer, et dans un second temps, du réseau de nettoyage des manches qui est propre au filtre et ne dépendant que de ce dernier.

a) Réseau aéraulique de tirage en filtration

Conformément à ce que nous venons de souligner précédemment, le Baghouse est intégré dans un large système, étant donné qu'il est destiné au dépoussiérage du four et du broyeur de farine crue. Etudier ce réseau, ce sera de connaître les divers points de fonctionnement du ventilateur de tirage qui constitue l'essentiel de la consommation énergétique du filtre. Pour cela, il faudra tout d'abord mettre en évidence le circuit de conduites afin de pouvoir déterminer les pertes de charge. Les canalisations à considérer sont celles qui partent de la sortie du ventilateur du broyeur et celle du ventilateur du four (ID Fan) jusqu'à la cheminée d'échappement de l'air rejeté.

(1) Mise en évidence du circuit de conduites

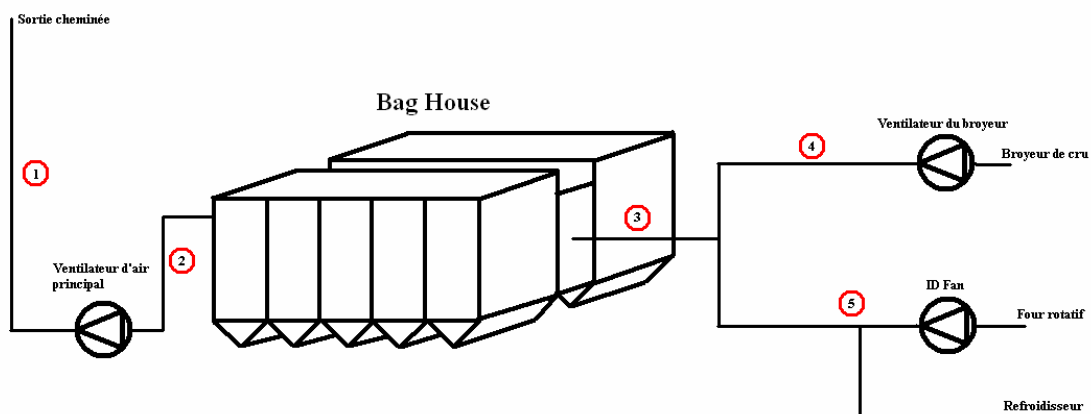


Figure 15: Circuit de conduites du réseau

La mise en évidence des différentes parties du réseau est importante dans la mesure où elle permet de déterminer les pertes de charge en fonction du diamètre, de la longueur et de la forme des conduites. Nous avons jugé donc nécessaire de subdiviser ce réseau en tronçons pour avoir une vue claire du circuit. Dans le schéma précédent, qui est une illustration très simplifiée du système, nous avons mis en exergue 5 portions essentielles. Il est donc à noter que dans ce dessin n'est mentionné aucune donnée concernant les hauteurs géométriques, les caractéristiques des jonctions (sources de pertes de charge) ou les changements de section.

Dans le tableau suivant, ce sont ces informations, en plus des longueurs et des diamètres des conduites, que nous fournirons conformément aux valeurs données dans les manuels du constructeur.

Portions	Conduites	Diamètres ou cotés	Longueurs	sections	formes
1	Cheminée	2800	94840	cylindrique	rectiligne
	Gaine d'entrée cheminée	2800	10585	cylindrique	rectiligne
	Gaine sortie ventilateur principal	1786	2210	carré	rectiligne
2	Gaine entrée ventilateur principal	2800	5188	cylindrique	rectiligne
	Gaine de sortie filtre	2800	2206	cylindrique	coude 90°
3	Gaine entrée filtre	2800	2206	cylindrique	coude 90°
	Gaine vers jonction	2800	2354	cylindrique	rectiligne
	Jonction gaines (ID Fan+Broyeur)	2650; 2240	3894	cylindrique	convergent
4	Gaine de départ de jonction	2240	5600	cylindrique	rectiligne
	Gaine vers sommet de circuit	2240	6161	cylindrique	rectiligne
	Sommet de circuit; changement de direction		3340	cylindrique	coude anguleux 75°
	Gaine de sortie du sommet de circuit	2240	6161	cylindrique	rectiligne
	Gaine de changement de direction	2240	2363	cylindrique	coude
	Gaine vers jonction	2240	4170	cylindrique	rectiligne
	Jonction	2240; 2240	4650	cylindrique	divergent
	Gaine de sortie jonction	2500	10740	cylindrique	rectiligne
	Changement de direction			cylindrique	coude 45°
Divergent du ventilateur du broyeur		9080			
5	Gaine départ jonction	2650	2088	cylindrique	coude 45°
	Somme de gaines	2650	12450	cylindrique	rectiligne
	Gaine vers sommet de circuit	2650	7291	cylindrique	rectiligne
	Sommet de circuit; changement de direction		3954	cylindrique	coude anguleux 75°

Gaine sortie de sommet de circuit	2650	7291	cylindrique	rectiligne
gaine vers changement de direction	2650	4865	cylindrique	rectiligne
Gaine de changement de direction	2650	2080	cylindrique	coude 30°
gaine vers jonction	5876	5560	cylindrique	rectiligne
Jonction	2240; 2650	4900	cylindrique	divergent
Gaine de sortie jonction	2650	3200	cylindrique	rectiligne
Jonction	2120; 1250	3520		convergent
Gaine sortie jonction	2120	4400	cylindrique	rectiligne
Changement de direction				coude 45°
Divergent du ventilateur		5293		

Tableau 7: Caractéristiques dimensionnelles des canalisations du réseau

(2) Détermination des points de fonctionnement du réseau

La détermination des points de fonctionnement est maintenant possible dès lors que nous avons les dimensions des canalisations. Ces dernières sont en acier de construction ; cela nous informe sur la rugosité des parois qui intervient dans le calcul des coefficients de pertes de charges si la viscosité de l'air transporté est connue d'après les conditions de fonctionnement. Il y a cependant des aspects très importants à mentionner et qui sont des impératifs à respecter pour assurer un bon fonctionnement :

- Le ventilateur d'air principal est commandé de telle sorte qu'il y ait toujours une pression de 2,5 mbar à la sortie de l'ID Fan.
- Pour le transport de poussières industrielles, il est recommandé d'avoir des vitesses moyennes d'écoulement de 18 à 20 m/s et supérieures à 24 m/s pour le ciment humide.

Toutefois le dimensionnement des tuyauteries découle d'un compromis technico-économique. Les équations qui découleront des prochains calculs ne sont utilisées qu'à des fins de diagnostic, surtout du ventilateur de tirage.

Pour notre part, nous considérerons deux cas de fonctionnement du réseau :

(a) Broyeur de cru en marche

Le Baghouse a été installé essentiellement pour traiter les poussières du broyeur de farine crue et celles du four rotatif. Cependant, il faudra noter que tout leur débit ne passe pas dans le filtre. En effet, les jonctions dont nous avons fait allusion dans le tableau précédent mettent en exergue un circuit de retour des gaz vers le broyeur et un circuit d'alimentation du broyeur en gaz chaud par le four. Cela s'effectue à l'aide de vannes régulées dont la présence ne gêne

pas le calcul des points de fonctionnement du réseau mais entraîne leur paramétrage par la variation de leur ouverture.

Lorsque le broyeur de cru est en marche, c'est l'ensemble des conduites énumérées tantôt qui sont intégrées dans les calculs. Le principe est le même que lors de dimensionnement de réseau hydraulique sauf que le fluide est maintenant de l'air dont la masse volumique est différente.

La démarche que nous allons utiliser est purement graphique étant donné que nous détenons les courbes caractéristiques du ventilateur d'air principal.

Nous appliquerons donc pour cela les équations d'énergie de la sortie des ventilateurs du broyeur et du four à la sortie de la cheminée. C'est presque le cas classique de ventilateurs refoulant un fluide partant de deux réservoirs vers un réservoir. La différence est que les pressions totales aux points de départ et au point d'arrivée ne se résume plus seulement à la hauteur géométrique : les pressions dynamiques et statiques sont prises en compte.

La sortie de la cheminée est à 131000mm d'altitude par rapport au niveau de la mer et les sorties des ventilateurs du four et du broyeur sont à peu près à 36000mm.

La valeur de la perte de charge engendrée par le Baghouse est d'environ 125 à 175 mmCE.

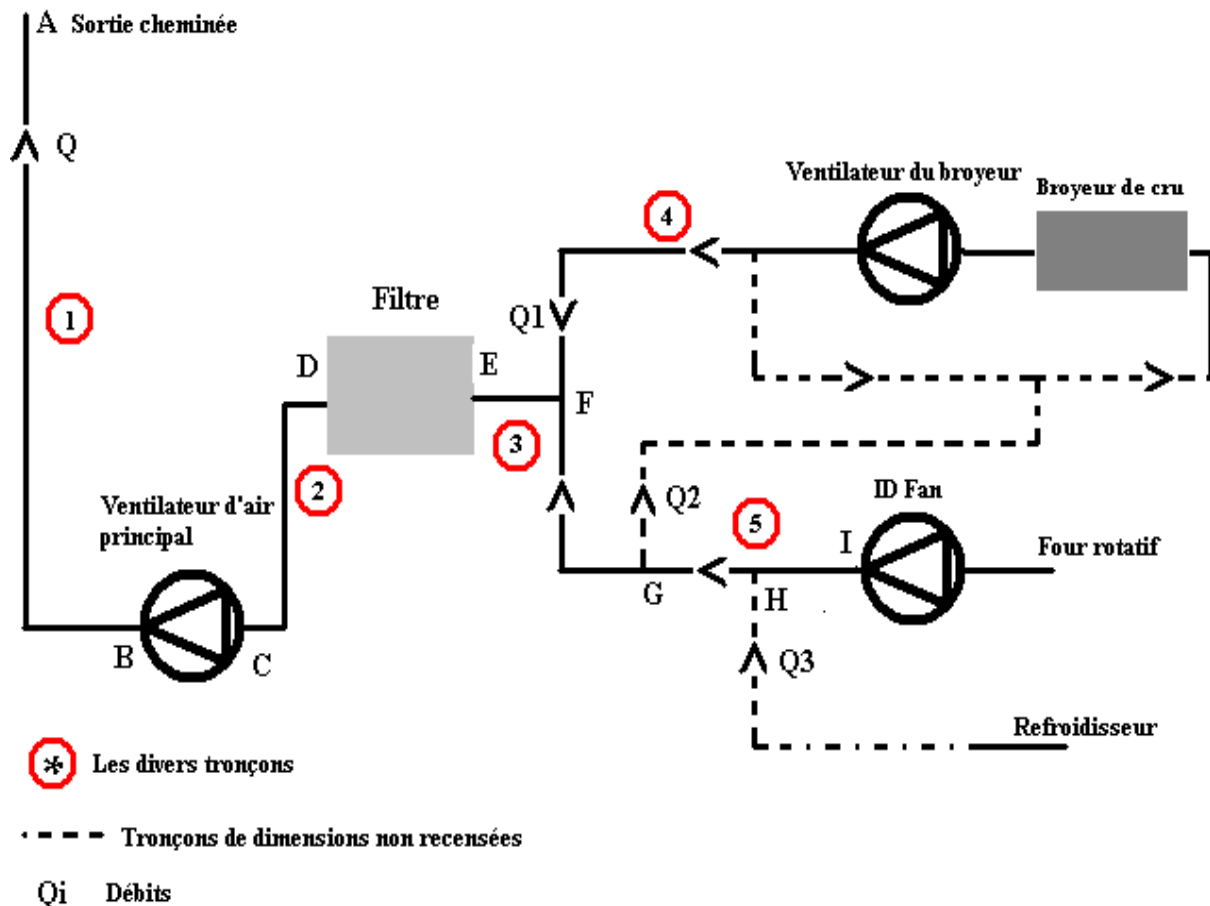


Figure 16: Circuit détaillé des conduites

Avant de passer aux équations d'énergie du point A au point I, il est nécessaire de définir certains paramètres tels que la masse volumique et la viscosité du fluide à prendre en compte dans les calculs. En effet:

- les **variations de température** tout le long du réseau nous oblige à choisir une valeur moyenne (donc approximative) de la masse volumique du fluide qui varie en plus avec la pression barométrique (donc avec l'altitude) du point par rapport au niveau de la mer.

$$\rho_m = \frac{\rho_A + \rho_I}{2} \text{ Avec } \rho_i = 1,293 \cdot \frac{P_{bi}}{1013} \cdot \frac{273}{273 + t_i} \text{ où } P_{bi} = -0,1125 \cdot H + 1011,5$$

H est en m et Pb en mbar

$$P_{bA} = 996,7625 \text{ mbar puisque } H_A = 131\text{m}$$

$$P_{bI} = 1007,45 \text{ mbar puisque } H_I = 36\text{m}$$

$$\rho_A = 0,902 \text{ kg/m}^3 \text{ puisque } t_A = 112^\circ\text{C}$$

$$\rho_I = 0,601 \text{ kg/m}^3 \text{ puisque } t_I = 311^\circ\text{C}$$

$$\rho_m = 0,7515 \text{ kg/m}^3$$

- On peut maintenant déduire de cette valeur de la masse volumique celle de la viscosité cinématique ν donnée par la formule:

$$\nu = \frac{1,53}{\rho_m} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(273 + t)^{1,5}}{413 + t} \text{ Avec } t = (t_A + t_I)/2 = 211,5^\circ\text{C}$$

$$\nu = 3,58 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

- Le nombre de Reynolds de l'écoulement dans chaque conduite peut être approché à priori puisque les vitesses en pratique avoisines les 20m/s.

Conduites	D ou De	ν	V	Re
A-B'	2,8	0,00003580	20	1564245,81
B'B carré	4,03	0,00003580	20	2251396,65
C-D	2,8	0,00003580	20	1564245,81
E-F	2,8	0,00003580	20	1564245,81
	2,65	0,00003580	20	1480446,93
F-G	2,65	0,00003580	20	1480446,93
	5,88	0,00003580	20	3282681,56
G-H	2,65	0,00003580	20	1480446,93
H-I	2,12	0,00003580	20	1184357,54

Nous remarquons que pour cette vitesse d'approximation, la valeur du nombre de Reynolds dans chaque conduite excède 10^5 . C'est pour cette raison que dans la formule de Colebrooke, nous nous permettrons de négliger le terme $Re\sqrt{\lambda}$.

- La valeur de λ est donnée, d'après ce qui précède, par la formule:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log_{10} \frac{k}{3,71 \cdot D} \quad [29]$$

Où k est la rugosité absolue qui vaut ici 0,15 pour l'acier galvanisé

Le tableau suivant donne les diverses valeurs de λ selon les conduites.

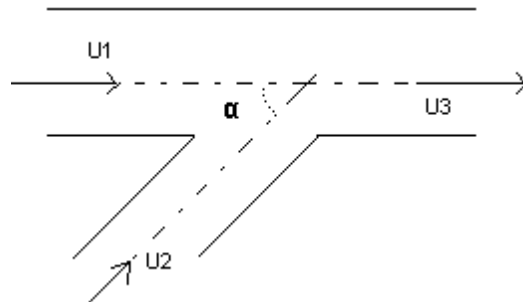
Conduites	D ou De	k	λ
A-B'	2,8	0,1500000	0,07380680
B'B carré	4,03	0,1500000	0,06258836
C-D	2,8	0,1500000	0,07380680
E-F	2,8	0,1500000	0,07380680
	2,65	0,1500000	0,07576272
F-G	2,65	0,1500000	0,07576272
	5,88	0,1500000	0,05346656
G-H	2,65	0,1500000	0,07576272
H-I	2,12	0,1500000	0,08454264

- Les coefficients de pertes de charge singulières peuvent être déterminés puisque nous avons les formes des zones d'accidents. Le tableau suivant nous montre quelques valeurs du coefficient de pertes de charge en fonction de la nature de la singularité.

<p><i>Restriction sans amorce</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>A_2/A_1</th> <th>ξ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,2</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>0,4</td> <td>0,4</td> </tr> <tr> <td>0,6</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>0,8</td> <td>0,2</td> </tr> </tbody> </table>	A_2/A_1	ξ	0,2	0,5	0,4	0,4	0,6	0,3	0,8	0,2	<p><i>Restriction avec amorce</i></p> <p>$\xi = 0,2$</p>																																
A_2/A_1	ξ																																										
0,2	0,5																																										
0,4	0,4																																										
0,6	0,3																																										
0,8	0,2																																										
<p><i>Élargissement sans amorce</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>A_2/A_1</th> <th>ξ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,1</td> <td>0,9</td> </tr> <tr> <td>0,2</td> <td>0,7</td> </tr> <tr> <td>0,4</td> <td>0,4</td> </tr> <tr> <td>0,6</td> <td>0,2</td> </tr> </tbody> </table>	A_2/A_1	ξ	0,1	0,9	0,2	0,7	0,4	0,4	0,6	0,2	<p><i>Élargissement avec amorce</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>A_2/A_1</th> <th>ξ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,1</td> <td>0,5</td> </tr> <tr> <td>0,2</td> <td>0,3</td> </tr> <tr> <td>0,4</td> <td>0,2</td> </tr> <tr> <td>0,6</td> <td>0,2</td> </tr> </tbody> </table>	A_2/A_1	ξ	0,1	0,5	0,2	0,3	0,4	0,2	0,6	0,2																						
A_2/A_1	ξ																																										
0,1	0,9																																										
0,2	0,7																																										
0,4	0,4																																										
0,6	0,2																																										
A_2/A_1	ξ																																										
0,1	0,5																																										
0,2	0,3																																										
0,4	0,2																																										
0,6	0,2																																										
<p><i>Diaphragme d'équilibrage</i></p> <p>A = aire section du tube A' = aire section du diaphragme</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>A'/A</th> <th>0,20</th> <th>0,25</th> <th>0,30</th> <th>0,35</th> <th>0,40</th> <th>0,45</th> <th>0,50</th> <th>0,55</th> <th>0,60</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ξ</td> <td>50</td> <td>30</td> <td>20</td> <td>15</td> <td>8</td> <td>7</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>	A'/A	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	ξ	50	30	20	15	8	7	4	3	2	<p><i>tubes et barres traversant une conduite</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Tubes</th> <th colspan="3">Barres</th> </tr> <tr> <th>e/d</th> <th>0,10</th> <th>0,25</th> <th>0,50</th> <th>h/d</th> <th>0,10</th> <th>0,25</th> <th>0,50</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ξ</td> <td>0,2</td> <td>0,6</td> <td>2,0</td> <td>ξ</td> <td>0,7</td> <td>1,4</td> <td>4,0</td> </tr> </tbody> </table>	Tubes			Barres			e/d	0,10	0,25	0,50	h/d	0,10	0,25	0,50	ξ	0,2	0,6	2,0	ξ	0,7	1,4	4,0
A'/A	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60																																		
ξ	50	30	20	15	8	7	4	3	2																																		
Tubes			Barres																																								
e/d	0,10	0,25	0,50	h/d	0,10	0,25	0,50																																				
ξ	0,2	0,6	2,0	ξ	0,7	1,4	4,0																																				
<p><i>Régulateur à volet</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>α</th> <th>0°</th> <th>10°</th> <th>20°</th> <th>30°</th> <th>40°</th> <th>45°</th> <th>50°</th> <th>55°</th> <th>60°</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ξ</td> <td>0,2</td> <td>0,6</td> <td>1,8</td> <td>4,4</td> <td>11</td> <td>21</td> <td>35</td> <td>65</td> <td>105</td> </tr> </tbody> </table>	α	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	55°	60°	ξ	0,2	0,6	1,8	4,4	11	21	35	65	105	<p><i>Régulateur à guillotine</i></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>h/d</th> <th>0,2</th> <th>0,3</th> <th>0,4</th> <th>0,5</th> <th>0,6</th> <th>0,7</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ξ</td> <td>30</td> <td>11</td> <td>5,2</td> <td>2,2</td> <td>1,3</td> <td>0,5</td> </tr> </tbody> </table>	h/d	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	ξ	30	11	5,2	2,2	1,3	0,5								
α	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	55°	60°																																		
ξ	0,2	0,6	1,8	4,4	11	21	35	65	105																																		
h/d	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7																																					
ξ	30	11	5,2	2,2	1,3	0,5																																					

Tableau 8: Quelques valeurs du coefficient ζ selon la singularité.

- élargissements progressifs de section: $\zeta = \left(1 - \frac{S_1}{S_2}\right)^2$ que l'on doit multiplier par $U_1^2 - U_2^2$ à un coefficient près.
- Changement de direction de l'écoulement:
 - coudes arrondis à section circulaire: $\zeta = \left[0,13 + 1,85 \left(\frac{R}{R_c}\right)^{3,5}\right] \cdot \frac{\theta}{90^\circ}$
 - coudes à angle vif: relation de Weisbach $\zeta = \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + 2 \sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right)$
- jonction: confluent et branchements
 - confluent:



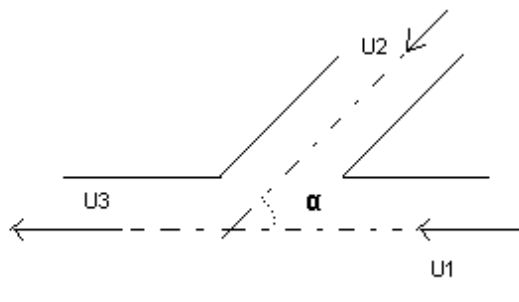
Lorsque $Q_2/Q_3 < 0,5$:

$$\zeta_{13} = 2 \left(\frac{Q_2}{Q_3}\right) - (1 + 2 \cos \alpha) \left(\frac{Q_2}{Q_3}\right)^2 \quad [30] \quad \text{et} \quad \zeta_{23} = -1 - 4 \left(\frac{Q_2}{Q_3}\right) + (1 + 2 \cos \alpha) \left(\frac{Q_2}{Q_3}\right)^2 \quad [31]$$

à multiplier avec U_3^2 .

Lorsque Q_2/Q_1 avoisinant 0,5 et $\alpha = 45^\circ$: $\zeta_{13} = 0,4$ et $\zeta_{23} = 0,2$

- branchements:



$$\zeta_{13} = 2 \left(\frac{Q_2}{Q_3}\right) - (1 + 2 \cos \alpha) \left(\frac{Q_2}{Q_3}\right)^2 \quad [32] \quad \text{et}$$

$$\zeta_{12} = -1 - 4 \left(\frac{Q_2}{Q_3} \right) + (1 + 2 \cos \alpha) \left(\frac{Q_2}{Q_3} \right)^2 \quad [33] \quad \text{à multiplier avec } U_1^2.$$

Lorsque Q_2/Q_1 avoisinant 0,5 et $\alpha = 45^\circ$: $\zeta_{13} = 0$ et $\zeta_{12} = 0,4$

Accidents	points	Angle	Localisation	Valeur de ζ
Changement de direction	a	45	Entrée cheminée-sortie ventilateur	0,35000
	b	90	Sortie filtre	0,17
	c	90	Entrée filtre	0,17
	d	45	Départ jonction F	0,08
	e	105	Sommet de circuit	1,39
	f	30	En aval du sommet de circuit	0,06
	g	45	Vers sortie ID fan	0,35
Confluent	h	45	Jonction H	0,4
	i	45	Jonction F	0,4
Branchement	j		Jonction G	0

Equation d'énergie:

Appliquons l'équation de Bernoulli entre le Point A à la sortie de la cheminée et le point I à la sortie de l'ID Fan en passant par les tronçons 1, 2, 3, et 5.

Nous obtenons:

$$E_{tA} - E_{tI} = -H_{frT} - H_{fsT} - H_{f\text{filtre}} + E_V + E_{RID} \quad [34]$$

Avec:

- E_{tA} et E_{tI} = Energie totale aux points considérés
- H_{frT} = somme pertes de charge régulières du circuit
- H_{fsT} = somme des pertes de charge singulières du circuit
- $H_{f\text{filtre}} = 175\text{mmCE} = 233,33\text{mC}$ du fluide
- E_V = énergie délivrée par le ventilateur de tirage
- $E_{RID} \sim 200\text{Pa} \sim 27,2 \text{ mC}$ du fluide = énergie de refoulement de l'ID Fan.

Calcul de la différence de pression $E_{tA} - E_{tI}$

$$E_{tA} = p_A + \rho \frac{U_A^2}{2} + \rho g z_A \quad [35]$$

$$E_{tI} = P_I + \rho \frac{U_I^2}{2} + \rho g z_I \quad [36] \quad \text{où } P = P_r + P_0 = \text{pression relative} + \text{pression atmosphérique}$$

Or $P_0(z_A) - P_0(z_I) = -\rho g (z_A - z_I)$ puisque le fluide considéré ici est de l'air

$$\text{Donc : } E_{tA} - E_{tI} = \left(P_{Ar} + P_{0A} + \rho \frac{U_A^2}{2} + \rho g z_A \right) - \left(P_{Ir} + P_{0I} + \rho \frac{U_I^2}{2} + \rho g z_I \right) \quad [37]$$

$$\Rightarrow E_{tA} - E_{tI} = \left(P_{Ar} + \rho \frac{U_A^2}{2} \right) - \left(P_{Ir} + \rho \frac{U_I^2}{2} \right) + (P_{0A} - P_{0I} + \rho g (z_A - z_I))$$

$$\Rightarrow E_{tA} - E_{tI} = \left(\rho \frac{U_A^2}{2} \right) - \left(P_{Ir} + \rho \frac{U_I^2}{2} \right) \text{ Puisque } P_{Ar} = 0 \text{ à la sortie de la cheminée}$$

$$\text{En terme de hauteur manométrique : } H_{tA} - H_{tI} = \left(\frac{U_A^2}{2g} \right) - \left(\frac{P_{Ir}}{\rho g} + \frac{U_I^2}{2g} \right) \quad [38]$$

$$\text{Avec : } U_A = \frac{Q}{S_A} \text{ et } U_I = \frac{(Q - Q_1 + Q_2 - Q_3)}{S_I}$$

$$H_{tA} - H_{tI} = \left(\frac{U_A^2}{2g} \right) - \left(\frac{P_{Ir}}{\rho g} + \frac{U_I^2}{2g} \right) \quad [39]$$

$$H_{tA} - H_{tI} = \left(0,0826 \cdot \frac{Q^2}{D_{AB}^4} \right) - \left(\frac{P_{Ir}}{\rho g} + 0,0826 \frac{(Q - Q_1 + Q_2 - Q_3)^2}{D_{HI}^4} \right) \quad [40]$$

Où $D_{AB} = 2,8\text{m}$; $D_{HI} = 2,12\text{m}$; $P_{Ir} = 2.5\text{mbar} = 250 \text{ Pa}$; $\rho = \rho_m = 0,75\text{kg/m}^3$

$$\text{En définitive : } \boxed{H_{tA} - H_{tI} = 0,0013438Q^2 - 0,0040891(Q - Q_1 + Q_2 - Q_3)^2 - 33,97} \quad [41]$$

Calcul des pertes de charge en fonction du débit

L'expression des pertes de charge peut être déterminée car nous avons déjà les valeurs des coefficients. Toutefois, les débits auxquels ils sont associés dépendent de la section considérée. Les valeurs des débits Q_1 , Q_2 , et Q_3 sont connus et dépendent de la régulation des équipements connectés au filtre.

● **Pertes de charge régulières**

On a :

$$\begin{aligned} H_{f_{rt}}(Q) &= H_{f_{rAB}}(Q) + H_{f_{rCD}}(Q) + H_{f_{rEF}}(Q) + H_{f_{rFG}}(Q - Q_1) \\ &+ H_{f_{rGH}}(Q - Q_1 + Q_2) + H_{f_{rHI}}(Q - Q_1 + Q_2 - Q_3) \end{aligned} \quad [42]$$

$$\text{Où } H_{f_{ri}}(Q) = 0,0826 \lambda_i \cdot \frac{L_i}{D_i^5} Q^2 = X_i Q^2$$

Tronçons	L(m)	λ	D	X
AB'	105,43	0,07380680	2,8	0,00373448
B'B	2,12	0,06258836	4,03	0,00001031
AB				0,00374479
CD	7,39	0,07380680	2,8	0,00026192
*EF1	2,56	0,07380680	2,8	0,00009068
*EF2	3,89	0,07576272	2,65	0,00018647
EF				0,00027715
*FG1	45,58	0,07576272	2,65	0,00218258
*FG2	4,9	0,05346656	5,88	0,00000309
FG				0,00218567
GH	3,2	0,07576272	2,65	0,00015323
HI	13,21	0,08454264	2,12	0,00215466

$$H_{frr}(Q) = 0,00428346Q^2 + 0,00218567(Q - Q_1)^2 + 0,00015323(Q - Q_1 + Q_2)^2 + 0,00215466(Q - Q_1 + Q_2 - Q_3)^2 \quad [43]$$

● **Pertes de charge singulières**

On a :

$$H_{fst}(Q) = H_{fsa}(Q) + H_{fsb}(Q) + H_{fsc}(Q) + H_{fsd}(Q - Q_1) + H_{fse}(Q - Q_1) + H_{fsf}(Q - Q_1) + H_{fsg}(Q - Q_1 + Q_2 - Q_3) + H_{fsh}(Q) + H_{fsi}(Q - Q_1 + Q_2) \quad [44]$$

Où: $H_{fri}(Q) = 0,0826 \cdot \frac{\zeta_i}{D_i^4} Q^2 = X_i' Q^2$

Singularités	ζ	D	X
a	0,35000	2,8	0,0004703425
b	0,17	2,8	0,0002278606
c	0,17	2,8	0,0002278606
d	0,08	2,65	0,0001419998
e	1,39	2,65	0,0023289380
f	0,06	2,65	0,0000946666
g	0,35	2,12	0,0014312086
h	0,4	2,65	0,0006699718
i	0,4	2,8	0,0005375364

$$H_{fst}(Q) = 0,0015960355(Q)^2 + 0,0025656044(Q - Q_1)^2 + 0,0005375364(Q - Q_1 + Q_2)^2 + 0,0014312086(Q - Q_1 + Q_2 - Q_3)^2 \quad [45]$$

Bilan final :

$$H_V = (H_{tA} - H_{tI}) + H_{frT} + H_{fST} + H_{ffiltre} - H_{RID} \quad [46]$$

$$H_V(Q) = \left[0,0013438Q^2 - 0,0040891(Q - Q_1 + Q_2 - Q_3)^2 - 33,97 \right]$$

$$+ \left[\begin{aligned} &0,0015960355(Q)^2 + 0,0025656044(Q - Q_1)^2 \\ &+ 0,0005375364(Q - Q_1 + Q_2)^2 + 0,0014312086(Q - Q_1 + Q_2 - Q_3)^2 \end{aligned} \right]$$

$$+ \left[\begin{aligned} &0,00428346Q^2 + 0,00218567(Q - Q_1)^2 \\ &+ 0,00015323(Q - Q_1 + Q_2)^2 + 0,00215466(Q - Q_1 + Q_2 - Q_3)^2 \end{aligned} \right] + 233,33 - 27,2$$

$$\boxed{H_V(Q) = 0,0072232955(Q)^2 + 0,0047512744(Q - Q_1)^2 + 0,0006907664(Q - Q_1 + Q_2)^2 - 0,0005032314(Q - Q_1 + Q_2 - Q_3)^2 + 172,16} \quad [46]$$

Connaissant donc les valeurs des débits Q_1 , Q_2 , Q_3 à chaque instant, on peut déterminer la valeur du débit Q dans la conduite du ventilateur de tirage en trouvant l'intersection de la courbe de l'expression ci-dessus avec la courbe caractéristique du ventilateur.

Sur cette même courbe, il est notamment possible d'avoir le rendement et la puissance.

Considérons, à titre d'exemple, un fonctionnement type avec $Q_1 = 400000\text{m}^3/\text{h}$; $Q_2 = 420000\text{m}^3/\text{h}$ et $Q_3 = 70000\text{m}^3/\text{h}$ et on a la représentation reflétant le comportement du réseau :

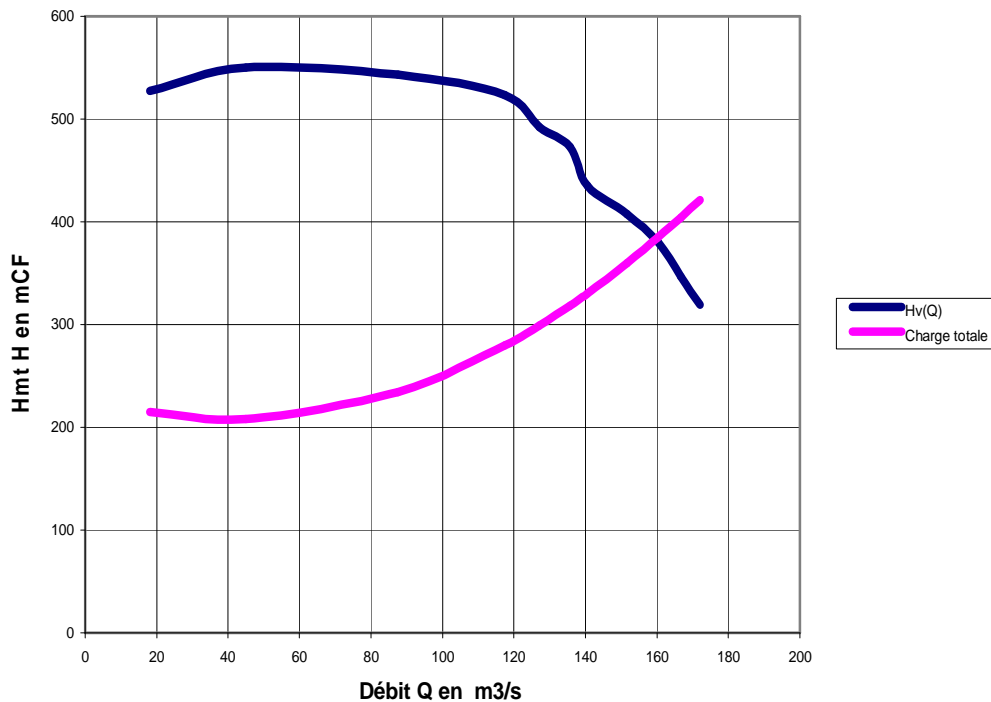


Figure 17: Point de fonctionnement, broyeur de cru en marche

Le point de fonctionnement obtenu est un débit $Q = 160,25 \text{ m}^3/\text{s}$ et une hauteur manométrique totale du ventilateur $H = 2830 \text{ Pa}$. Ce qui correspond à un rendement de $\eta = 71\%$.

(b) Broyeur de cru à l'arrêt

Lorsqu'on considère le cas du broyeur de farine crue à l'arrêt, nous ne sommes guère obligés de reprendre les calculs déjà élaborés précédemment.

En effet, la modélisation est la même que précédemment avec d'ailleurs plus de facilité, étant donné que la même équation de bilan est reprise. La seule différence est que les valeurs de Q_1 et Q_2 deviennent nulles puisque le broyeur n'est plus alimenté en gaz chaud par le four et le refroidisseur.

Nous en déduisons donc que:

$$H_v(Q) = 0,0126653363(Q)^2 - 0,0005032314(Q - Q_3)^2 + 172,16 \quad [47]$$

Nous remarquons désormais que cette équation est paramétrée par la seule valeur du débit Q_3 envoyé par le refroidisseur. La même méthode graphique est applicable pour déterminer le point de fonctionnement du ventilateur.

On obtient pour la même valeur de $Q_3 = 70000 \text{ m}^3/\text{h}$:

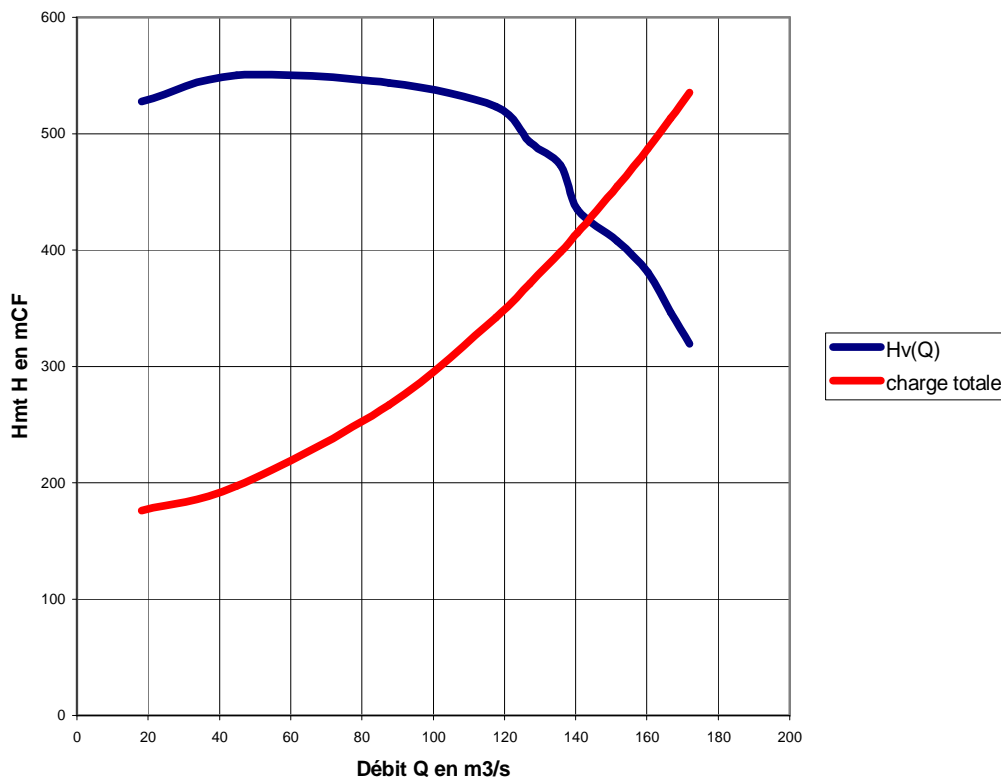


Figure 18: Point de fonctionnement, broyeur de cru à l'arrêt

Pour ce cas : $Q = 144 \text{ m}^3/\text{s}$; $H = 3127 \text{ Pa}$ et $\eta = 73,7\%$.

b) Réseau aéraulique de décolmatage

Le réseau aéraulique de décolmatage des manches est de constitution bien plus élémentaire que celle du réseau aéraulique de tirage. Il est composé d'un ventilateur, d'une gaine d'aspiration connectée à la chambre d'air propre et d'une gaine de refoulement connectée à un petit circuit qui débouche vers chacun des compartiments par l'intermédiaire des vannes d'air reverse.

Nous avons fait la remarque que l'étude du point fonctionnement de ce réseau demande plus de réflexion que précédemment. En effet, au cours du nettoyage, le ventilateur aspire à partir de la chambre d'air propre pour refouler dans une enceinte que l'on peut considérer pratiquement fermé. Le phénomène que nous notons dans ce cas, c'est une augmentation de la pression à l'intérieur de la chambre ; ce qui fait que nous assistons à un régime transitoire de l'écoulement du fluide.

En essayant d'appliquer le Théorème de Bernoulli entre la chambre d'air propre et la chambre en cours de nettoyage, nous constaterons que l'énergie au point de refoulement varie. Si la situation était maintenue, nous pouvons à priori avancer que c'est le même phénomène que la réaction de turbine en hydraulique qui risque d'arriver. En aéraulique, on parle plutôt du phénomène de pompage du ventilateur.

C'est pour cette raison que l'étude du point de fonctionnement de ce ventilateur n'a pas été développée dans ce document. Il pourrait cependant faire l'objet d'une étude à part entière puisque sa réelle maîtrise permettrait de connaître plus exactement la durée de vie des manches par les calculs de fatigue du matériau. En maîtrisant les variations de pressions en chaque point de la chambre par le ventilateur, nous serions capables de déterminer les forces appliquées sur les manches de manière instantanée et de prévoir leurs usures.

D. Conclusion

Les réseaux aérauliques du Baghouse sont faciles à appréhender du point de vue géométrique. Cependant, la détermination des points de fonctionnement de leurs éléments moteurs, à savoir les ventilateurs, reste complexe du fait de l'interaction du filtre avec les autres équipements pour l'un et pour l'autre, du fait du caractère transitoire que revêt l'écoulement du fluide.

Cela dit, la connaissance en temps réel du rendement du ventilateur de tirage conduire par des corrections du système à une réduction de la consommation énergétique habituelle. La

maîtrise du ventilateur d'air inverse, pour sa part, servira à mieux contrôler le mécanisme de nettoyage des manches et de mieux juger de leur durée de vie.

Chapitre V. Etude de la maintenance du Baghouse

A. Introduction

Nous venons de voir, de part l'étude précédente, que le filtre Baghouse est un système relativement complexe quand il s'agit de comprendre son dimensionnement. Nous aurions pu nous appesantir sur cet aspect s'il s'agissait d'un avant-projet. Mais, étant donné que le dispositif est déjà existant, il est préférable de pouvoir s'accommoder aux diverses fluctuations des paramètres aérauliques.

Vu la criticité du dispositif, l'objectif de la maintenance ne sera certainement pas l'attente de la panne. A travers une recherche perpétuelle d'amélioration du fonctionnement, des opérations telles que des tests, des inspections, allant du quotidien à l'annuel selon l'importance des sous-systèmes, doivent être menées et demande le plus souvent une très grande précision.

Contrairement à ce que beaucoup pourrait penser, la maintenance et la réparation ne partage pas une relation d'identité mais plutôt d'inclusion car la maintenance n'est pas obligée d'attendre qu'une panne survienne pour intervenir dans le fonctionnement d'un dispositif. Au contraire, son objectif est de pouvoir assurer un fonctionnement continu et optimal des machines en exploitation.

Pour ce faire, il est bien évidemment primordial d'avoir des informations sur le comportement au quotidien de ces appareils afin de s'y familiariser et même de prévoir d'éventuels dysfonctionnements dont certains sont incontournables.

Le filtre Baghouse, étant un système automatisé et bien contrôlé, sa manipulation et son suivi sont d'autant plus faciles que la documentation relative à son installation et son mode d'utilisation est bien archivée. Cependant, il est clair qu'il est impossible d'éviter la panne à 100%. Nous définirons dans la suite les divers modes de défaillances possibles en y joignant les modes d'interventions curatives correspondantes.

Nous nous permettrons ensuite la proposition d'un planning de tâches préventives périodiques, de visite et d'inspection, à effectuer par les ressources humaines compétentes. Son application permettrait au bout d'un temps plus ou moins long d'avoir une maîtrise suffisante des réactions du système dans sa globalité.

B. Modes de défaillance et maintenance curative

Comme tout dispositif mécanique, la fiabilité du Baghouse n'est pas totale. Il existe des pannes sous plusieurs formes qui s'avèrent inévitables au cours de son fonctionnement. La première chose à faire, et qui est d'ailleurs la plus délicate, c'est le diagnostic de la défaillance en question. Bien évidemment, un phénomène peut avoir plusieurs causes à la fois. Le travail de l'ingénieur sera dès lors de pouvoir en déceler la bonne en procédant, avec beaucoup de soin, par élimination.

Dans le tableau suivant, nous avons tenté de recenser les défaillances envisageables avec, s'il y a lieu, les actions à mener pour y remédier.

Défaillances	Causes probables	Remèdes	Actions pratiques
Chute de pression trop haute entre les collecteurs du Baghouse	Dysfonctionnement du système de nettoyage des manches	Vérifier tous les composants du système de nettoyage	S'assurer d'un débit adéquat du ventilateur reverse (mesures de débit ou d'intensité de courant) Vérifier si les vérins de commande des vannes de retour et de purge sont bien pilotés
	Mauvais nettoyage des manches	Modifier le cycle de nettoyage en cours	Entrer les modifications nécessaires sur le programme de nettoyage
	Bourrage au niveau de la récupération des matières	Vérifier le bon état de marche des convoyeurs à vis	Inspecter les moteurs d'entraînement des vis
	Manches bouchées dû à l'humidité	Rechercher d'éventuelles zones de fuites d'air extérieur ; assécher si possible les manches; remplacer manches si le phénomène persiste	Disposer de source d'air propre et sec pour assécher les manches si possible;
			Suivre la procédure de remplacement des manches
	Capacité du Baghouse dépassée	Vérifier et corriger le débit de matière à traiter	Réguler automatiquement le débit d'air envoyé au Baghouse
Chute de pression trop basse entre les collecteurs du Baghouse	Manomètre défectueux ou mal branché	Inspecter et réparer ou remplacer	
	Conduites obstruées en aval du filtre	Déboucher et vérifier la vitesse des gaz normalement supérieur à 15m/s	Arrêter l'installation
			Déboucher la section colmatée
Manches trop nettoyées	Réduire la pression de nettoyage du ventilateur d'air inversé et/ou réduire le temps de nettoyage	Agir sur le volet du ventilateur ou modifier le temps de nettoyage dans le programme	

Emissions excessives de poussières	Manches trouées ou déchirées	Remplacer les manches	Suivre la procédure de remplacement des manches
	manches desserrées à la base	Resserrer de manière adéquate le collier de fixation	Après un temps plus ou moins long, revérifier la tension des manches récemment installées
	Manches trop poreuses dû à leur durée de vie	Tester un échantillon représentatif ; Réduire la pression de nettoyage du ventilateur et/ou réduire le temps de nettoyage	Remplacer un nombre représentatif de manches d'une chambre suspectée pour des tests de porosité
	Mauvaise étanchéité des vannes	Inspecter et réparer	En arrêt de l'installation, mesurer le jeu compris entre la vanne et son logement pour évaluer l'étanchéité
Bruits forts ou inhabituels	vibrations	Tester les paliers des systèmes d'entraînement	
	Eléments mobiles sollicités ou cassés	Inspecter tous les éléments mobiles	S'il y a lieu (selon l'intensité du bruit), arrêter l'installation et vérifier les vérins, les moteurs, les ventilateurs...
	courroies en usure	Suivre la procédure de maintenance de courroies	
Corrosion	infiltration d'air	Vérifier l'étanchéité de l'enceinte	
	Conditions de mise à l'arrêt inadéquates du Baghouse	Minimiser la durée des inspections	Préparer au mieux les interventions pour perdre moins de temps
Courte durée de vie des manches	Tension trop grande ou trop faible des manches	Régler la tension des manches à la valeur prescrite	Utiliser l'appareillage destiné à cet effet s'il est disponible

Tableau 9: Modes de défaillance et d'interventions correctives

C. Planning d'inspections périodiques

Dans la partie précédente, il était question des modes de défaillances que nous pouvions rencontrer au cours du fonctionnement du dispositif. Toutefois, ces pannes doivent être évitées au maximum en suivant en temps réel le comportement du Baghouse. A travers des visites d'inspection et des opérations systématiques comme la lubrification, il est possible

d'optimiser le Temps de Bon Fonctionnement (TBF) des divers éléments qui constituent le système.

Le tableau suivant est un planning de maintenance préventive qui recense l'essentiel des composants du Baghouse en donnant la nature et la périodicité des interventions systématiques dont ils font l'objet. Nous pouvons distinguer 6 fonctions de maintenance :

La **lubrification (1)** ; Le **nettoyage (2)** ; L'**inspection et la correction éventuelle de défauts (3)** ; La **visite d'état du dispositif (4)** ; Le **remplacement (5)** ; Le **test de bonne marche (6)**.

Les opérations peuvent être : Journalières (J) ; Mensuelles (M) ; Annuelles (A) ; Référence au manuel d'instructions (T).

6. Test de marche							
5. Remplacement							
4. Vérification							
3. Inspection et ajustement							
2. Nettoyage							
1. Lubrification							
Réf. No.	Composants	1	2	3	4	5	6
1.0	Manches et enceinte du baghouse			M			
1.1	Colliers de serrage des manches			M			
1.2	Différentiel de pression des chambres				J		
2.0	Ventilateur de tirage						
2.1	Paliers du ventilateur	T			M		
2.2	Roue du ventilateur		2A		M		
2.3	Moteur d'entraînement				T		T
2.4	Transmission			M			
2.5	Vannes de la conduite d'admission		2A		2A		
3.0	Ventilateur d'air inversé						
3.1	Paliers du ventilateur	T			M		
3.2	Roue du ventilateur		2A		M		
3.3	Moteur d'entraînement				T		T

3.4	Transmission			M			
3.5	Vanne de régulation du ventilateur		2A		2A		
4.0	Récupérateurs à vis						
4.1	Paliers des récupérateurs à vis	T			J		
5.0	Convoyeurs à raclettes		M				
5.1	Paliers des convoyeurs à raclettes	T			J		
5.2	Vis de réglage des convoyeurs	T			H		
6.0	Convoyeurs à vis						
6.1	Paliers des convoyeurs à vis	T			J		
7.0	Sas rotatifs						
7.1	Paliers des sas rotatifs	T			J		
8.0	Indicateurs de paramètres						
8.1	jauges de pression Magnéhélic						2A
8.2	Opacimètre						2A
8.3	Modules de chauffage et de contrôle Thermon						2A
9.0	Mécanismes de nettoyage		2A				
9.1	Cycle de nettoyage				J		
9.2	Vérins pneumatiques				H		
9.3	Vannes d'air				2A		
9.4	Circuit d'air comprimé				M		

Tableau 10: Planning de maintenance préventive

Le paragraphe suivant donne les spécifications de quelques opérations mentionnées dans le planning de maintenance préventive. Les références mentionnées permettent de voir les correspondances.

➤ **1.2 Mesures des Δp : efficacité du filtre et état de ses manches**

La prise de mesure de la pression différentielle est très importante et permet de juger de l'efficacité du filtre par rapport aux données recommandées par le constructeur. Les valeurs des pressions en amont et en aval sont déjà disponibles dans la salle de contrôle. Cela n'exclue pas que des vérifications soient nécessaires de temps à autres. Par contre, pour voir les valeurs de pression à travers chaque compartiment, il sera obligatoire de se rendre au niveau du dispositif étant donné qu'elles sont fournies par des manomètres de pression différentielle.

En tout état de cause, la vérification est très importante et les méthodes sont diverses. On peut procéder par mesure de la pression par **un tube de Pitot** (méthode décrite auparavant) ou par mesure directe du débit d'où nous déduisons la pression dynamique et les vitesses d'écoulement. Ces deux paramètres sont très importants pour éviter le colmatage sur les parois.

Les prises de mesure se feront donc quotidiennement :

- entre les chambres d'air propre et les chambres d'air sale pour connaître l'état des manches en fonctionnement, pour voir l'étanchéité des vannes des chambres en isolation par rapport au système.
- entre l'entrée et la sortie du filtre pour vérifier la perte de charge recommandée entre les collecteurs du Bag House pour une bonne filtration.

➤ **9.1 Surveillance du cycle de nettoyage: adéquation du programme :**

Le programme du dispositif peut, pour une raison ou pour une autre, faire l'objet d'une modification. Lors de ce changement peuvent survenir des erreurs de qui peuvent bouleverser très considérablement le fonctionnement d'une grande partie de l'usine. Il s'agira donc de vérifier si l'ordre des diverses séquences de fermeture et d'ouvertures des vannes est respecté et si tous les éléments automatisés fonctionnent correctement. Il faudra s'enquérir de la structure et des temps proposés dans le programme à titre de référence pour pouvoir juger d'un quelconque dysfonctionnement.

➤ **Visite de détection de bruit ou d'anomalies visuelles :**

La présence d'inhabituelles vibrations ou de bruits peut témoigner d'un changement d'état d'un des éléments du filtre. Les circuits pneumatiques des vérins qui sont chargés de la commande des vannes doivent être dans un état irréprochable puisque leur présence est critique pour l'ensemble. Les émanations de gaz ou de poussières en tout point sont à éviter car elles influencent directement les performances du circuit. Cependant, les points à vérifier le plus sont la cheminée d'évacuation à l'atmosphère et les convoyeurs de récupération de matière qui sont les meilleurs indicateurs d'anomalies à soigner dans les plus brefs délais.

➤ **Inspection des éléments mobiles:**

Les convoyeurs à vis ou encore les vérins de commande des vannes peuvent être victimes d'usure étant donné que dans leur mouvement, ils sont en contact permanent avec d'autres éléments de machine et la poussière. Des défauts dans leur mouvement peuvent renseigner sur d'éventuelles pièces usées au fil du temps et qui doivent être immédiatement remplacées pour éviter les avaries graves. Les tests visuels ou au toucher de vibrations ou de balourds, à effectuer par le visiteur, sont suffisants dans un premier temps pour juger d'un bon comportement ou non.

➤ **8.0 Vérifier les indicateurs de paramètres:**

Ces indicateurs sont sensés donner des informations sur divers paramètres du dispositif. Toutefois s'ils sont défectueux, mal calibrés ou sujet à un mauvais tarage, ils ne sont d'aucune utilité, et pire, peuvent être la source d'erreur monumentale surtout si ils ont la capacité d'influencer un programme du processus. Tous les manomètres d'indication de pressions (Magnéhélic), les éléments indicateurs de la température dans les trémies (Thermon) et indicateurs d'émanations de poussières (opacimètre) doivent être vérifiés.

➤ **2.0 ; 3.0 Vérifier le bon fonctionnement du dispositif d'entraînement des ventilateurs :**

Les ventilateurs sont les plus importants du système car sans eux tout s'arrête. Des tests de vibrations sur leur moteur ou d'échauffement des paliers sont à effectuer. Cela intervient dans le rendement global du ventilateur donc sur la puissance réellement consommée par ce dernier. Toute défaillance détectée sur le dispositif d'entraînement des ventilateurs d'air principal ou d'air inverse doit être immédiatement signalée et éliminée.

➤ **1.1 Vérifier la tension des manches dans chaque chambre:**

Cette opération est nécessaire car la tension des manches influe sur leur efficacité et leur durée de vie. Des manches suffisamment bien tendues supposent, à l'instar du serrage des boulons, des valeurs de tensions spécifiques que, seuls des appareils peuvent en avoir la précision et qui sont sûrement disponible sur le marché. Cela peut éviter la détérioration des manches à certains endroits habituels comme la base ou les anneaux des manches.

➤ **1.0 Recherche d'éventuels trous ou marque d'abrasions sur les manches:**

Suite à de mauvaises valeurs des différences de pression montrées par les jauges, la présence de trous peut être soupçonnée sur les manches d'une chambre. Le Bag House en contenant 180 par chambre, il est obligatoire de faire une ronde d'inspection pour en voir les défectueuses. Nous recommandons ici cette même inspection même si aucune anomalie n'est détectée. Chaque chambre devra être inspectée systématiquement au moins une fois par mois quelque soit son état.

➤ **1.0 Recherche de marques de corrosion dans l'enceinte du Baghouse :**

C'est une action qui peut être menée en même temps que la précédente. Il faut souligner que la tôle chaudronnée de l'enceinte du filtre n'est pas exempte des effets de corrosion et d'oxydation du fait des caractéristiques du fluide et de la température en son sein. La vérification de l'usure des parois est relativement simple puisqu'elle est visuelle. Les points chauds sont facilement détectables et sont à signaler car, dans un temps plus ou moins long,

peuvent engendrés des problèmes par rapport à l'étanchéité thermique du dispositif. En outre, le décochage du matériau la paroi, même si c'est faible, est à surveiller pour ce filtre qui est supposé subsisté durant toute l'existence de l'usine.

➤ ***1.1 Vérification du serrage de la base de toutes les manches:***

Les bases des manches doivent être bien serrées pour la seule et bonne raison que si elles cèdent à la pression des ventilateurs (surtout au nettoyage où elles sont secouées), le phénomène de filtration est annulé. Toute la poussière de la chambre passerait à la chambre d'air propre pour être évacuer dans l'atmosphère. Il faut donc, dès l'installation de nouvelles manches, vérifier le serrage des bagues à leur base et c'est une opération que l'on répétera en même temps que celles décrites précédemment.

D. Conclusion

Ces plannings de maintenance dont nous venons de faire la proposition donnent un aperçu de la manière dont le Baghouse pourrait être suivi et entretenu. Il faut avouer que ces plannings ont la possibilité d'être beaucoup plus affinés en rassemblant les informations des divers constructeurs des sous éléments pour n'en faire qu'un seul document. Ainsi, nous pouvons remarquer que pour assurer la lubrification, il est à chaque fois nécessaire de se référer aux fiches techniques des constructeurs de l'appareil en question.

Chapitre VI. Recommandations : optimisation du Baghouse

A. Introduction

Cette partie relève beaucoup plus de la pratique et traite globalement :

- de l'optimisation de la consommation énergétique des ventilateurs de tirage et d'air inverse,
- de la régulation du mode de tirage de la matière,
- de la régulation du mode de nettoyage des manches,
- de l'optimisation de la durée de vie des manches,
- de la réduction des émanations de poussières au-dessous des limites permises.

B. Consommation énergétique du ventilateur de tirage

Pour réduire au maximum la consommation d'énergie d'un ventilateur, il faut qu'il fonctionne à son rendement maximal. On avait déjà montré que le point de fonctionnement du ventilateur de tirage variait en fonction des paramètres de marche des équipements qui constituent son environnement. Tout dépend donc des débits dans les divers tronçons du réseau qui sont les causes des variations des pertes de charge et du rendement.

Il faut d'abord à remarquer que les valeurs instantanées des débits dans les divers tronçons, évoquées dans les calculs de points de fonctionnement du ventilateur de tirage, ne sont pas disponibles. Il aurait été préférable de disposer d'un débitmètre dans chacune de ces canalisations pour avoir un moyen de contrôle automatique des points de fonctionnement comme cela est fait pour divers équipements au niveau de la salle de commande.

L'idée serait de pouvoir implémenter dans un programme les équations d'énergie trouvées et, selon l'information transmise par les débitmètres, pouvoir calculer et afficher le rendement η , la hauteur manométrique totale H et la puissance P du ventilateur.

Cette opération pourrait permettre par la suite de trouver le moyen de réduire la consommation électrique du ventilateur en essayant d'agir sur son rendement.

C. Régulation du débit d'alimentation du four

Après la récupération des poussières au niveau des convoyeurs à vis, elles sont acheminées directement vers le four rotatif. Cependant, les quantités envoyées, de même que les

intervalles de temps d'alimentation enregistrés, ne sont pas régulières. Cela est souvent à l'origine de perturbations au niveau du four.

La proposition que nous faisons pour la résolution de ce problème est l'installation d'un réservoir tampon équipé de modules de chauffage où toutes les poussières récupérées du Bag House seront d'abord acheminées et éventuellement tester chimiquement. Il sera possible à l'image du Low Tank de connaître très exactement la quantité envoyée dans le four ainsi que la température de la matière si cela s'avère nécessaire.

Le seul problème susceptible de se poser est l'emplacement de ce réservoir au sein du système.

D. Régulation des volets d'entrée des trémies

Nous avons tantôt souligné que le débit traversant le Baghouse pouvait varier selon le fonctionnement des autres systèmes. Si ce débit varie, c'est que nécessairement la vitesse au niveau des collecteurs va aussi changer. Cependant, bien que considérant ces fluctuations, les manches quant à elles exigent une seule et même valeur de la pression dynamique qui permet, de façon adéquate, à la matière de se fixer sur leur paroi lors du tirage.

En outre, après le nettoyage d'une chambre, les manches doivent retrouver une épaisseur de gâteau bien donnée pour avoir une filtration efficace. Il faut donc accélérer l'entrée des particules dans la chambre considérée pour favoriser le colmatage des manches.

Toutes ces hypothèses nous amènent à conclure que les volets d'entrée des trémies devraient être équipés de commandes par servomoteur pour réguler les débits d'entrée instantanés dans les 10 chambres.

Cette opération pourrait notamment servir lors de l'isolement ou de la mise en service de chambres suite à un arrêt précédent pour des causes d'inspection ou d'intervention (changement de manches).

E. Régulation du mode de nettoyage

Quand nous parlons de la régulation du mode de nettoyage, nous faisons allusion à la manière dont le ventilateur d'air reverse agit sur les manches d'une chambre donnée.

Si nous sommes d'accord qu'une chambre, dont un grand nombre de manches vient juste d'être remplacé, et une chambre, constituée de manches ayant déjà formé un gâteau de matière

solide et apte à une bonne filtration, ne doivent guère subir les mêmes effets du ventilateur reverse, alors nous trouverons plus que trivial la régulation du fonctionnement de ce dernier. C'est pour cette raison que nous aurions proposé la variation instantanée, au besoin, du débit d'air soufflé par le ventilateur en rendant automatique le mouvement de sa vanne de régulation.

Il est, dans de tel cas, possible de faire des économies d'énergie sur la consommation de ce ventilateur en plus de la durée de vie des manches optimisée parce qu'elles seraient nettoyées de manière adéquate.

F. Augmentation de la durée de vie des manches

Deux facteurs influent en général sur la durée de vie des manches. Il s'agit de leur tension et des caractéristiques du nettoyage.

Pour ce qui est de la tension, il est possible, d'après un spécialiste du filtre Bag House envoyé par la Société F.L.Smith, de se procurer un appareil automatique qui fournirait la tension nécessaire aux manches pour accroître leur stabilité en fonctionnement et éviter les abrasions par chocs. Trop tendues, les manches se détériorent à leur partie supérieure vers la coupelle et quand elles ne sont pas assez tendues conduisent à des abrasions des tissus par frottement les unes aux autres.

Comme mentionné auparavant, il serait intéressant de maîtriser les forces appliquées sur les manches lors de leur nettoyage. Si les sacs sont trop fortement secoués et pas suffisamment fixés ou tendus, des chocs peuvent se produire entre eux. Dans ce cas, la pression du ventilateur de nettoyage devrait tourner autour de 40mmCE.

G. Réduction des émanations de poussières

Les courbes décrites par le signal fourni par l'opacimétrie montrent des pics d'émissions de poussières pouvant dépasser le cap des 100 mg/m³. Ces pics sont tout simplement dus aux résidus de poussières présents dans la chambre juste après le nettoyage et aspirés par le ventilateur principal dès que la chambre nettoyée est remise dans son circuit.

Nous avons pu maintes fois remarqué, lors d'inspections, qu'à l'intérieur des chambres un lit de matières uniforme se formait. Cela témoigne de la porosité des manches, non pas du fait qu'elles ne soient pas adéquate, mais plutôt du fait que depuis leur installation, elles n'ont jamais vraiment pu former un gâteau de poussières qui puisse être maintenu.

L'importance d'une procédure spéciale pour la remise en service d'une chambre auparavant inspectée est ici mise en évidence.

Avec le dispositif actuel, nous pensons qu'il est possible d'avoir moins de 20 mg/m³ d'émissions poussiéreuses. Plus encore, il existe des filtres qui ont atteint le taux de 3 mg/m³ grâce à l'addition de membranes en PolyTétraFluoroEthylène (PTFE) qui ont une capacité de rétention accrue même sans la formation de gâteau.

H. Conclusion

L'optimisation du Baghouse n'est pas une chose facile à entreprendre. Elle demande une connaissance très approfondie du système afin de savoir sur quel dispositif agir. C'est un long processus qui demande des investissements coûteux mais, en évaluant la perte d'énergie enregistrée durant son exploitation, la résolution de ces problèmes deviendrait très vite une priorité.

Dans cette conclusion, nous avons jugé bon de proposer l'extension de ces procédures à tous les filtres de l'usine. Certes le Baghouse est le plus important d'entre eux mais, s'intéresser aux autres sections du processus de l'usine permettrait de maîtriser la globalité du système de filtration des Ciments Du Sahel S.A., qui connaît des défaillances à certains niveaux.

Conclusion générale

Les émanations de poussières provenant de machines de traitement ont longtemps été un phénomène courant dans les entreprises de production telles que les cimenteries. Elles peuvent contribuer de façon significative à la dégradation de l'environnement et l'amplitude de cette contribution dépend des caractéristiques des gaz comme leur composition chimique.

Les particules fines ainsi rejetées n'étaient auparavant pas prises en compte dans le bilan des coûts économiques. En réalité, même pour les dispositifs récents de filtration et de récupération, la quantité de matières traitée s'évalue à l'échelle de la tonne par heure ; ce qui représente une partie non négligeable en terme de production. Pour l'atmosphère, toute cette poussière n'est qu'un facteur de détérioration de plus et qu'il faut impérativement maîtriser.

C'est dans ce contexte que s'est inscrit ce projet avec pour but majeur de comprendre et d'optimiser le phénomène du dépoussiérage et de la filtration aux Ciments Du Sahel S.A. Ainsi, l'objet principal de cette étude a été de surveiller le comportement du dispositif de filtration le plus imposant de l'usine qui est le Baghouse.

Nous avons consacré la première partie à une présentation sommaire de l'entreprise, de son mode d'organisation et de son processus de fabrication du ciment. Il s'en était suivi des généralités concernant le dépoussiérage et la filtration où nous avons fait l'inventaire de quelques équipements fonctionnant selon les théories de la filtration. Cela nous a permis de voir que les filtres à manches sont les dispositifs les plus efficaces quand il s'agit du traitement de fines particules avec des rejets à moins de $3\text{mg}/\text{m}^3$ suivant les manches utilisées.

Les Ciments Du Sahel utilisent justement ce type de filtre tel que nous l'avons constaté dans le troisième chapitre. Ces filtres, qui forment près d'une cinquantaine, laissent paraître une certaine uniformité dans les principes de fonctionnement mais leur taille et leur capacité de traitement des gaz permettent de les différencier et de juger de leur présence dans des points précis du processus de fabrication. L'un des plus importants filtres de l'usine est le Baghouse sur lequel nous nous étions focalisés dans toute la suite.

Il s'est alors agi d'étudier ce filtre dépoussiéreur du four rotatif et du broyeur de farine crue et nous avons pu constater que son fonctionnement, même s'il est bien automatisé, mérite d'être amélioré pour minimiser la consommation d'énergie. En effet, une meilleure régulation du système vis-à-vis des équipements connexes, afin de maintenir le rendement du ventilateur de tirage à sa valeur maximale, permettrait de faire des économies de coûts d'électricité. La solution proposée découle directement de l'équation que nous avons établie et qui est paramétrée par les valeurs des débits d'air provenant du refroidisseur, du four rotatif et du broyeur de cru.

Nous aurions pu en faire de même pour le ventilateur d'air de retour mais la modélisation du circuit de ce dernier est plus compliquée avec une variation du point de fonctionnement au cours même du nettoyage pendant lequel la pression augmente dans la chambre. Nous pensons donc que ce phénomène devrait faire, à lui seul, l'objet d'une étude.

Enfin, nous avons pu établir les plans de maintenance corrective et préventive du Baghouse qui peuvent être plus détaillés en intégrant les instructions d'utilisation prescrites par les constructeurs des divers sous-éléments du filtre. Aussi, l'extension de cette démarche aux autres filtres de l'usine permettrait de résoudre une fois pour toutes les problèmes de filtration en quelconque point de la cimenterie.

Références bibliographiques

R. OUZIAUX, J. PERRIER. Mécanique des fluides appliquée, Dunod éditions 1989.

Pierre NEVEU, Conservatoire National des Arts et Métiers. Aéraulique, Mai 2000

M. CALEFFI. Hydraulique, Octobre 2005

Philippe De MAISONNEUVE. Le précis d'aspiration, 2006

Archives des C.D.S. S.A. Instructions d'utilisation et flow sheet du Baghouse, 2001

Liste des figures

Figure 1: Organigramme de l'entreprise.....	11
Figure 2: Diagramme synoptique du processus de fabrication	16
Figure 3: Schéma d'un cyclone	20
Figure 4: Schéma d'un séparateur électrostatique	22
Figure 5: Schéma d'une chambre en filtration.....	44
Figure 6: Schéma d'une chambre en nettoyage	45
Figure 7: Schéma de principe du tirage et du nettoyage	46
Figure 8: Illustration d'un circuit aéraulique élémentaire	47
Figure 9: Variation des pressions tout le long du réseau.....	51
Figure 10: Principe de mesure des pressions statique et dynamique	53
Figure 11: Principe pratique de mesure.....	54
Figure 12: Principe du tube de Pitot.....	56
Figure 13: Schéma d'une roue de ventilateur centrifuge	59
Figure 14: Caractéristiques d'un ventilateur centrifuge réel	60
Figure 15: Circuit de conduites du réseau	61
Figure 16: Circuit détaillé des conduites.....	64
Figure 17: Point de fonctionnement, broyeur de cru en marche	71
Figure 18: Point de fonctionnement, broyeur de cru à l'arrêt	72

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des fibres disponibles sur le marché.....	25
Tableau 2 : Classement des filtres de type IN	31
Tableau 3: Classement des filtres de type CE1	32
Tableau 4: Classement des filtres de type CE2	33
Tableau 5: Classement des filtres de type Filtax	34
Tableau 6: Inventaire des filtres de l'usine	36
Tableau 7: Caractéristiques dimensionnelles des canalisations du réseau.....	63
Tableau 8: Quelques valeurs du coefficient ζ selon la singularité.	66
Tableau 9: Modes de défaillance et d'interventions correctives	78
Tableau 10: Planning de maintenance préventive.....	80