
Année Universitaire : 2021-2022



Master Sciences et Techniques en Génie Industriel

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques

Optimisation Des Performances Du Broyeur Ciment

Lieu : FST FES

Référence : 07/22-MGI

Présenté par :

GLAOUI FAROUK

Soutenu Le 20 Juillet 2022 devant le jury composé de :

- Pr. M. ABARKAN (encadrante)
- Mr. MOHAMED BADRAOUI (encadrant Société)
- Pr. D. SQALLI HOUSSAINI (examinateur)
- Pr. N. EL OUAZZANI (examinateur)

Stage effectué à : CIMAT- Ciment de l'atlas



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

Nom et prénom : Glaoui Farouk

Année Universitaire : 2021/2022

Titre : Optimisation des performances du broyeur ciment

Résumé

L'usine CIMAT Ben Ahmed, spécialisée dans la production et la commercialisation du ciment, afin d'assurer le fonctionnement optimal des installations et par conséquent une performance idéale, une maintenance préventive et améliorative des équipements. Dans ce cadre on va travailler sur l'un des équipements les plus critiques d'usine, à savoir le broyeur ciment. Le présent projet de fin d'études s'inscrit dans cette perspective par l'optimisation des performances du broyeur ciment.

On a commencé par comprendre le flux de matières à travers l'usine, ses transformations et le fonctionnement des diverses installations. Chose qui nous a permis d'évaluer et pondérer le potentiel de chaque section.

Alors la résolution de la problématique va se faire par une analyse fonctionnelle pour étudier le besoin et déterminer les exigences à respecter dans le cahier des charges s'ensuivra par une analyse AMDEC qui sera effectuée pour repérer les éléments et les pannes critiques.

Ayant identifié une zone critique du broyeur ciment, On a procédé à chercher des solutions amélioratives pour régler les problèmes repérés et garantir une disponibilité maximale du broyeur.

Mots clés : Broyeur à boulets, ciment, CIMAT, broyeur ciment, optimisation, clinker.

Abstract

The CIMAT Ben Ahmed factory, specialized in the production and marketing of cement, in order to ensure the optimal functioning of the installations and therefore an ideal performance, a preventive and improvement maintenance of the equipment. In this context, we will work on one of the most critical equipment of the plant, namely the cement mill.

The present graduation project is part of this perspective by optimizing the performance of the cement mill. We began by understanding the flow of material through the factory, its transformations and the operation of various facilities. This allowed us to evaluate and weight the potential of each section.

Then the resolution of the problem will be done by a functional analysis to study the need and determine the requirements to be met in the specifications followed by a FMECA analysis that will be carried out to identify the critical elements and failures.

Having identified a critical area of the cement mill, we proceeded to look for improving solutions to solve the identified problems and guarantee a maximum availability of the mill.

Key words : Ball mill, cement, CIMAT, cement mill, optimization, clinker.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

A mes Parents.

A mon frère, A ma sœur.

A tous ceux qui ont prié pour moi.

GLAOUI FAROUK

Remerciment

Le présent travail n'a pu aboutir que grâce à l'aide précieuse de plusieurs personnes auxquelles je tiens à témoigner ma gratitude, avant tout, je tiens à remercier, le corps professoral du Département Génie Industriel de la faculté des sciences et techniques de Fès pour la formation prodiguée le long de ces deux années du cycle de master.

J'adresse ainsi mes remerciements les plus sincères au Pr. M. ABARKAN, mon encadrant, pour m'avoir accordé de son temps précieux et d'avoir un suivi de près riche en conseils et encouragements.

Je tiens également à remercier Pr. D. SQALLI HOUSSAINI et Pr. N. EL OUAZZANI qui m'ont fait l'honneur de juger mon travail, je remercie également Mr SAIDI Badr Eddine Directeur de l'usine CIMAT et Mr MOUKADIRI Abdellah responsable logistique, qui m'ont donné l'occasion d'effectuer ce stage.

J'exprime mes sincères remerciements à Mr ANASSIRI Rachid, Mr. BADRAOUI Mohammed et LAMZABI Yasser, mes encadrants à CIMAT Ben Ahmed, qui, malgré ses occupations, ont trouvé le temps pour m'assister, guider et prodiguer les conseils nécessaires au bon déroulement de mon projet. Je tiens à exprimer, spécialement, mes gratitudes les plus sincères envers l'ensemble de l'équipe de maintenance qui sont toujours montrés patiente et serviable à mon égard. Je leur suis reconnaissant pour le temps qu'ils m'ont accordé malgré leur charge de travail.

Enfin, J'adresse mes vifs remerciements à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Liste des figures :

Figure 1.1: Schéma simplifié du processus d'élaboration du ciment.....	4
Figure 1.2: La carrière du ciment.....	5
Figure 1.3: Parc de Pré-homogénéisation.....	5
Figure 1.4: Broyeur à galets.....	6
Figure 1.5: Tour de préchauffage.....	7
Figure 1.6: Four rotatif.....	7
Figure 1.7: Broyeur ciment horizontale.....	8
Figure 1.8: Types des broyeurs.....	9
Figure 1.9: Broyeur à couteaux.....	9
Figure 1.10: Broyeur à marteaux.....	10
Figure 1.11: Broyeur à barre.....	10
Figure 1.12: Broyeur à broches.....	11
Figure 1.13: Broyeur à boulets.....	11
Figure 1.14: Broyeur à galets.....	12
Figure 2.1: Processus d'analyse fonctionnelle.....	14
Figure 2.2: Diagramme de bête à cornes du système.....	15
Figure 2.3: Diagramme pieuvre du système.....	16
Figure 2.4: La décomposition structurelle du broyeur à boulets.....	20
Figure 2.5: Vue d'ensemble du broyeur.....	21
Figure 2.6: Arrangement broyeur coté commande.....	22
Figure 2.7: Palier à patin.....	23
Figure 2.8: Patin Hydrodynamique.....	23
Figure 2.9: Schéma hydraulique.....	24
Figure 2.10: La lubrification du réducteur COMBIFLEX.....	25
Figure 2.11: Historique d'entretien du réducteur.....	34
Figure 2.12: Roulement avec rayures et écaillages.....	34
Figure 2.13: Historique de changement des cartouches BK1.....	35
Figure 2.14: Les groupes GV, MV et PV du réducteur BK1.....	36
Figure 2.15: Historique de vibration du groupe GV au niveau des accouplements 301 et 302.....	36
Figure 2.16: Centrale de lubrification.....	37
Figure 3.1: Algorithme d'analyse statique.....	40
Figure 3.2: Une coupe du carter anti-poussière.....	41
Figure 3.3: 1 ère étape de l'analyse statique.....	42
Figure 3.4: 2ème étape de l'analyse statique.....	43
Figure 3.5: Répartition de la contrainte équivalente de Von-Mises sur le carter.....	44
Figure 3.6: Répartition de la déformation élastique équivalente sur le carter.....	45
Figure 3.7: Répartition du déplacement directionnel sur le carter.....	46
Figure 3.8: Schéma d'extension du réservoir.....	48
Figure 3.9: Centrale de lubrification de CIMAT.....	48
Figure 3.10: Schéma proposée de la séparation des circuits de lubrification.....	49
Figure 3.11: Schéma proposée pour l'amélioration de la filtration.....	50
Figure 3.12: Schéma du redimensionnement de la filtration.....	51

Liste des Tableaux :

Tableau 1.1: Pourcentage des constituants de chaque type de ciment	4
Tableau 2.1: Contrôle de validation du besoin	15
Tableau 2.2: Caractéristiques des fonctions de service.....	16
Tableau 2.3: Planning de travail	18
Tableau 2.4: Cotation de l'indice de gravité	26
Tableau 2.5: Cotation de l'indice de détectabilité	26
Tableau 2.6: Cotation de l'indice de fréquence	26
Tableau 2.7: Evaluation de la criticité	26

Liste des abréviations :

AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et leur Criticité
ANSYS	Analysis of Systems
BK	Broyeur clinker
BP	Basse Pression
CATIA	Conception Assistée Tridimensionnelle Interactive Appliquée
CPJ	Ciment Portland Composé
FC	Fonction Contrainte
FMECA	Failure Mode and Effect Critical Analysis
FP	Fonction Principale
GV	Grande Vitesse
HP	Haute pression
MEF	La méthode des éléments finis
MV	Moyenne Vitesse
PV	Petite Vitesse

Table des Matières :

Résumé.....	
Abstract.....	
Dédicace.....	
Remerciement	
Listes des figures :	
Liste des Tableaux :	
Liste des abréviations :	
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Contexte du projet.....	3
1.1 Processus d'élaboration du ciment au sein de CIMAT :.....	4
1.1.1 Préparation de la matière première	4
1.1.2 Préparation de la farine crue.....	6
1.1.3 Préparation de clinker	7
1.1.4 Préparation du ciment	8
1.2 Types des broyeurs :	8
1.2.1 Broyeur à couteaux :	9
1.2.2 Broyeur à marteaux :.....	9
1.2.3 Broyeur à barres ou plaques de choc :	10
1.2.4 Broyeur à broches :	11
1.2.5 Broyeur à boulets :.....	11
1.2.6 Broyeur à galets :	12
Chapitre 2 : Analyse des défaillances du broyeur à boulets	13
2.1 Analyse fonctionnelle :	14
2.1.1 Analyse fonctionnelle externe du système :	14
2.1.2 Analyse fonctionnelle interne du système :	15
2.2 Orientation du sujet :	17
2.2.1 Description du sujet :	17
2.2.2 Problématique et démarche de résolution :	17
2.2.3 Planning des tâches prévus :.....	18
2.3 Analyse AMDEC des équipements de l'atelier broyage ciment :	19
2.3.1 Décomposition structurelle :.....	19
2.3.2 Description des composants du broyeur à boulets :	21
2.3.3 Tableau AMDEC :.....	25
2.3.4 Classification des pannes :	32
2.3.5 Analyse des problèmes critiques :.....	33
Chapitre 3 : Proposition des solutions d'amélioration	39

3.1	Introduction d'un carter anti poussière :	40
3.1.1	Analyse statique du carter :	40
3.1.2	Les étapes de simulation ANSYS :	40
3.2	Solutions possibles au niveau du centrale hydraulique :	47
3.2.1	Redimensionnement de l'unité de stockage d'huile :	47
3.2.2	Séparation de lubrification Réducteur – Patins :	48
3.2.3	Amélioration de la filtration	49
	Conclusion Générale.....	52
	Références	53

Introduction Générale

Créée en 2007, CIMAT est une entreprise marocaine spécialisée dans la production et la commercialisation du ciment, aujourd'hui CIMAT détient deux cimenteries d'une capacité globale de 3,2 millions de tonnes par an, situées à ben Ahmed et béni Mellal et mises en service respectivement en avril 2010 et janvier 2011, et 9 centres de broyages situés en Afrique.

Depuis son lancement, CIMAT est connue par son engagement sérieux en ce qui concerne la maintenance préventive et améliorative des équipements. Dans ce cadre nous allons travailler sur l'un des équipements les plus critiques d'usine, à savoir le broyeur ciment ; c'est un équipement qui se trouve à la fin de la chaîne de production, et qui permet d'obtenir le ciment.

Le sujet de PFE consiste donc à optimiser les performances du broyeur ciment. Pendant leur fonctionnement, le réducteur qui fait partie du groupe de commande du broyeur ciment (type : broyeur à boulets) subit des vibrations importantes, causant l'endommagement rapide des roulements du réducteur et par suite la dégradation de son état, chose qui exige des interventions préventives et correctives continues. Ces interventions prolongent la durée de vie du réducteur mais diminuent en même temps la disponibilité du broyeur. D'où la nécessité des solutions d'amélioration.

La dégradation du réducteur du broyeur ciment est un problème grave, car elle influe sur la productivité de toute l'usine, mais la proposition des solutions amélioratives et réalisables au futur demeure souhaitable. Pour y parvenir on doit répondre à deux questions : Quelles sont les causes racines de la dégradation du réducteur ? comment peut-on minimiser la dégradation ?

La résolution de la problématique va se faire en plusieurs étapes, en premier temps une analyse AMDEC sera effectuée pour repérer les éléments et les pannes critiques, s'ensuivra la proposition des solutions d'amélioration pour régler les problèmes repérés.

Le premier chapitre est dédié au processus d'élaboration du ciment au sein de l'usine de ben Ahmed à travers les différentes sections et installations participant à celle-ci, s'ensuivra une généralité sur les broyeurs, une partie qui va illustrer le fonctionnement du broyeur, son intérêt et ses types existants.

Le deuxième chapitre concerne l'analyse fonctionnelle et celle des défaillances du broyeur à boulets. Nous y développerons en premier temps une analyse AMDEC, pour

déterminer les typologies de défaillances, leurs causes et leurs criticités. S'ensuivra une analyse des problèmes critiques retenus, et une proposition d'un plan d'action.

Le troisième et dernier chapitre est consacré à la proposition des solutions d'amélioration pour la résolution définitive des problèmes affectant l'état du réducteur afin d'améliorer les performances du broyeur ciment.

Chapitre 1 : Contexte du projet

Le premier chapitre traitera les procédés d'élaboration du ciment, suivie par des généralités sur les broyeurs. L'objectif de cette partie est d'illustrer le fonctionnement du broyeur ciment, et citer les différents types des broyeurs existants.

1.1 Processus d'élaboration du ciment au sein de CIMAT :

L'usine de CIMAT ben Ahmed utilise le procédé par voie sèche. C'est donc ce procédé que nous allons décrire en détaillant chacune de ses étapes. Avant d'obtenir le produit fini qui est le ciment. Les matières premières subissent plusieurs transformations physico-chimiques et ce en plusieurs étapes, de l'extraction jusqu'à l'expédition.

Les gammes de ciments se diffèrent selon leurs types, « le tableau 1.1 » contient les pourcentages des constituants de chaque type :

Type du ciment	%clinker	%gypse	%ajouts
CPJ 35	70%	5%	25%
CPJ 45	80%	5%	15%
CPJ 55	90%	5%	5%

Tableau 1.1: Pourcentage des constituants de chaque type de ciment.

La figure ci-dessous illustre le procédé d'élaboration du ciment qu'on va détailler par la suite :

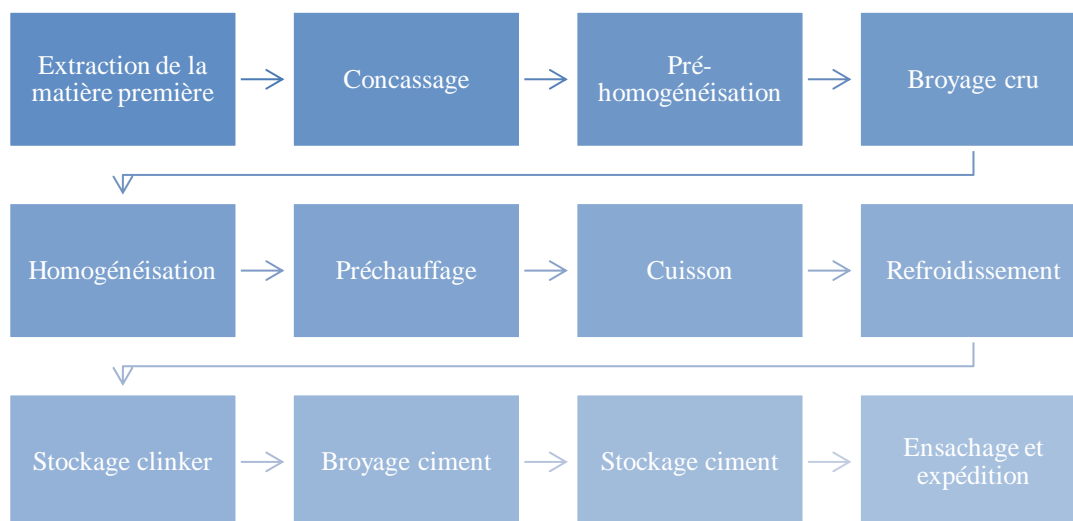


Figure 1.1: Schéma simplifié du processus d'élaboration du ciment.

1.1.1 Préparation de la matière première

1.1.1.1 Carrière

La carrière constitue la source en matière première qui subit de transformation pour obtenir le ciment. Elle se situe à proximité de l'usine, et extraite sous forme de bloc de pierre de dimensions très variées, par abattage en grand masse au moyen d'explosifs. Les autres matières considérées comme des métiers correctifs (sable et minerai de fer) sont extraites d'autres carrières et transportées jusqu'à l'usine pour être stockées, [1].



Figure 1.2: La carrière du ciment.

1.1.1.2 Concassage

Les roches de calcaire sont transportées par des camions, qui introduisent la matière première dans une trémie, liée à un ATM (alimentateur à tablier métallique) alimentant le concasseur, cette opération a pour but de réduire la granulométrie de la matière première en fragments de faibles dimensions (inférieur à 80 mm) et assurer un certain mélange des matières premières arrivant de la carrière (calcaire et schiste). Pour concasser sa matière première CIMAT utilise un concasseur à marteaux à deux rotors avec un débit maximal de 1200 t/h, [1].

1.1.1.3 Pré-homogénéisation

La matière concassée tombe dans un convoyeur sous-concasseur, qui alimente le parc polaire, le mélange est disposé en couches successives selon la longueur ou la circonférence du hall de stockage et prélevé perpendiculairement à l'axe des couches, [1].



Figure 1.3: Parc de Pré-homogénéisation.

1.1.2 Préparation de la farine crue

1.1.2.1 Dosage automatisé des matières premières

Les halls de stockage sont équipés par des systèmes gratteurs qui extraient la matière première stockée et alimentent respectivement les différents récupérateurs, qui transportent, à son tour le calcaire mixte et les additifs (schiste, sable, fer) vers les trémies d'alimentation respective du broyeur cru.

Chaque matière est stockée dans une trémie doseuse indépendante, les matières sortant de ces trémies sont mises sous contrôle d'un appareil doseur correcteur qui analyse en temps réel le flux de la matière afin d'avoir la composition recommandée par le laboratoire de contrôle.

1.1.2.2 Le broyage cru

Le broyage de la matière première est une opération qui consiste à préparer un mélange cru homogène avec une bonne répartition granulométrique pour assurer les meilleures conditions de cuisson. Le broyeur utilisé est un broyeur vertical à galet avec un débit de 280 t/h, [1].

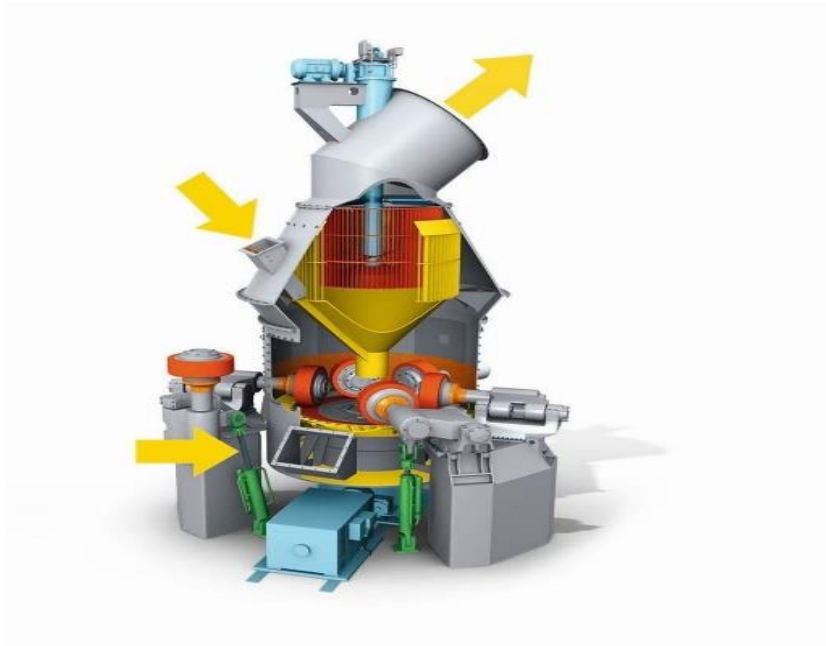


Figure 1.4: Broyeur à galets.

1.1.2.3 Homogénéisation et stockage

Après le broyage, le cru sera transporté avec les élévateurs à godets vers les silos où il sera homogénéisé et stocké, la capacité de ces silos est de 11000t.

1.1.3 Préparation de clinker

1.1.3.1 Tour de préchauffage

La cuisson de clinker se fait par voie sèche : la farine est introduite dans un préchauffeur à 850°C composé de 10 cyclones empilés les uns au-dessus des autres en formant une tour de 120m de hauteur. Cette étape est incontournable dans les installations de cuisson modernes, elle permet de préparer la farine de point de vue chimique et thermique. Le préchauffage se fait en exploitant une partie de l'énergie calorifique évacuée par les gazes d'exhaure du four, [1].

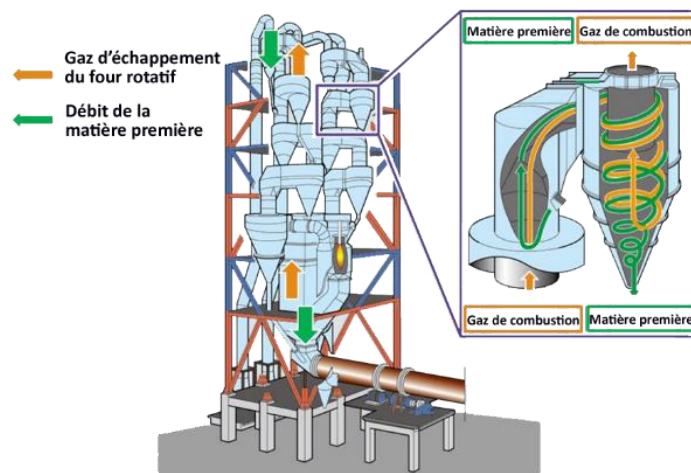


Figure 1.5: Tour de préchauffage.

1.1.3.2 Cuisson

Le four est un tube cylindrique, de longueur 64m et de 4 à 5m de diamètre, tourne autour de son axe de 1 à 4 tours/min. il est incliné de 5%. La rotation et la pente du four font avancer la matière vers la zone de combustion, où il atteint une température maximale de 1450°C, [1].



Figure 1.6: Four rotatif

Il est constitué par une virole en acier, protégée par un revêtement intérieur en matériaux réfractaires.

1.1.3.3 Refroidissement

Le clinker quittant le four tombe dans le refroidisseur pour subir une trempe de 1450°C à 100°C, et passe par un concasseur à cylindre pour être réduit. Il est ensuite acheminé par des élévateurs et des bandes transporteuses vers un silo de stockage.

1.1.4 Préparation du ciment

1.1.4.1 Broyage ciment

Le clinker, le gypse et les ajouts, dont la taille est plus importante que celle du ciment, sont introduits au niveau d'un broyeur horizontal à boulets, avec des proportions prédéfinies pour subir des efforts mécaniques de broyage et produire ainsi le ciment, le dosage du clinker, du gypse et des ajouts se fait à l'entrée du broyeur par un système de dosage automatique.

Le ciment sortant du séparateur est transporté par un convoyeur à bande vers des élévateurs à godets alimentant deux silos (12 tonnes chacun) via un système de soufflage pneumatique. (Voir annexe A), [1].



Figure 1.7: Broyeur ciment horizontale.

1.2 Types des broyeurs :

La figure suivante présente les différents types des broyeurs :

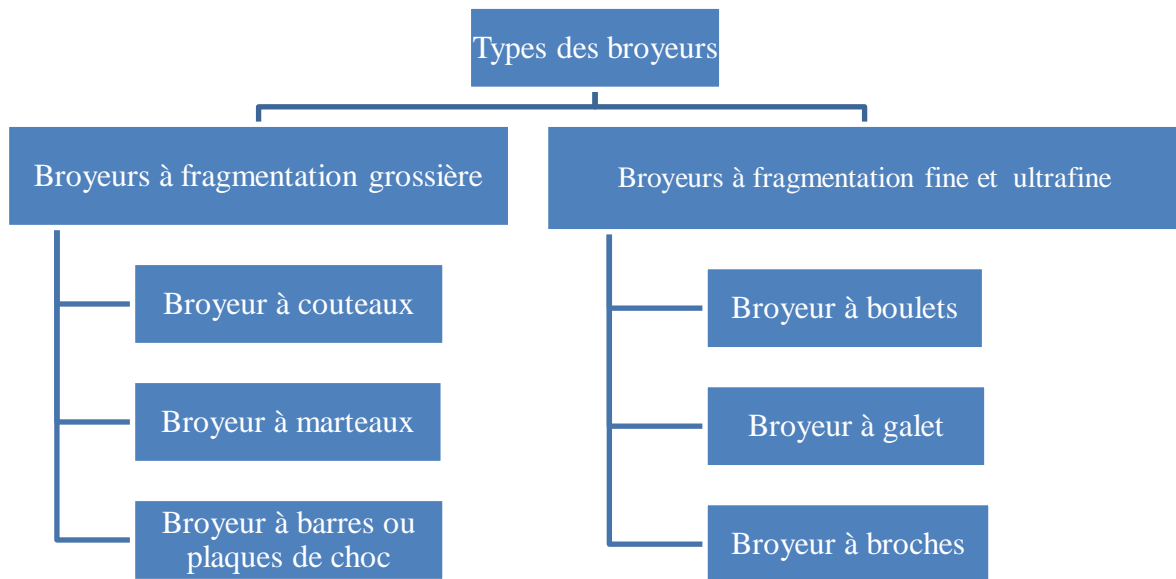


Figure 1.8: Types des broyeurs

1.2.1 Broyeur à couteaux :

Ils sont utilisés généralement pour broyer du plastique ou du papier. Le rotor porte les couteaux et le broyage se fait par cisaillement. Le broyeur à couteaux convient aux matériaux tendres, encombrants, fibreux ou sensibles à la température, [2].



Figure 1.9: Broyeur à couteaux.

1.2.2 Broyeur à marteaux :

Les broyeurs à marteaux comportent un ou deux rotors équipés de marteaux en acier à haute teneur en manganèse. Ce sont les seuls équipements utilisés pour le broyage des ferrailles, des carcasses automobiles et des ordures ménagères. Ils sont parfois utilisés également pour le

concassage de produits moyennement abrasifs, durs ou semi durs, mais résistent moins bien à l'usure, [3].

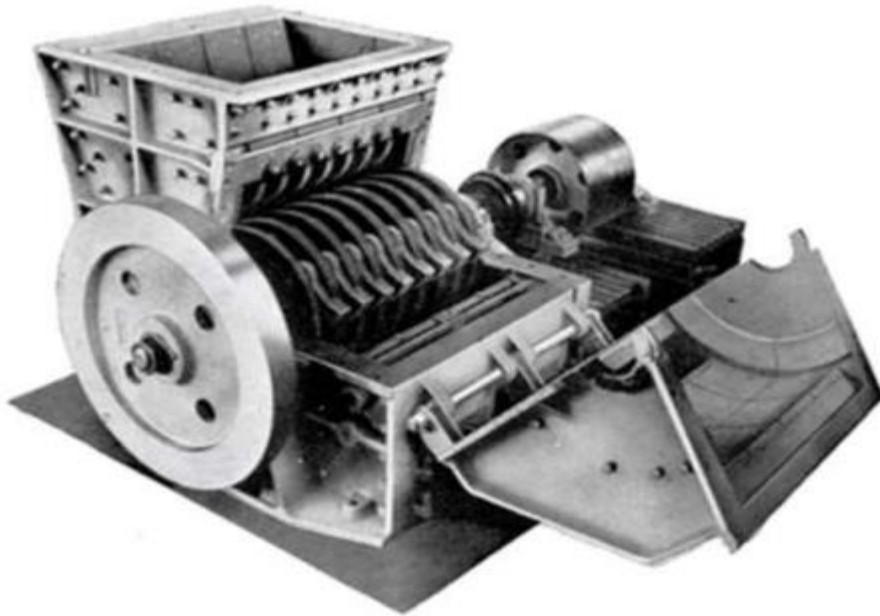


Figure 1.10: Broyeur à marteaux

1.2.3 Broyeur à barres ou plaques de choc :

Les broyeurs à barres sont constitués d'acier à haute résistance, et des plaques d'usure interchangeables qui recouvrent les plaques de choc. Ils sont utilisés pour le broyage grossier (concassage), en particulier pour les produits durs et abrasifs (roches par exemple), [3].

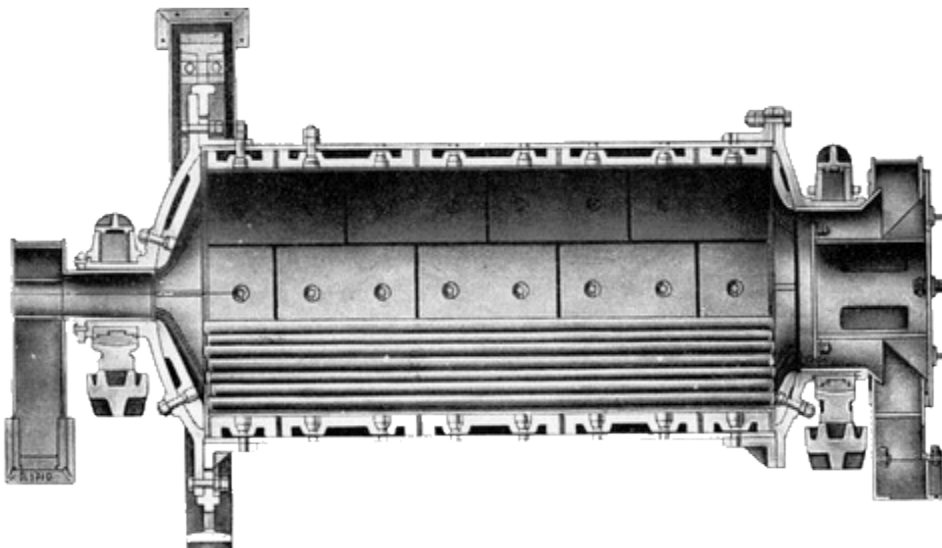


Figure 1.11: Broyeur à barre

1.2.4 Broyeur à broches :

Le broyeur à broches est équipé d'un disque à broches fixe et d'un disque rotatif et permet d'obtenir une grande finesse de poudre. Une chambre de broyage de large dimension permet même de broyer des matériaux ayant tendance à colmater. La finesse de broyage peut être ajustée en modifiant la vitesse du disque à broches. Les forces centrifuges agissant sur les deux disques permettent, entre autres, de microniser des produits humides, gras ou collants. L'utilisation de modules à broches avec des chambres de grandes tailles peut par ailleurs permettre dans certains cas une bonne dissipation de la chaleur générée et donc de traiter des produits thermosensibles tels que le cacao par exemple, [4].



Figure 1.12: Broyeur à broches.

1.2.5 Broyeur à boulets :

Le broyeur à boulets est un outil important pour remoudre les matières après le concassage. Le broyeur à boulets s'applique largement dans les métiers tels que le ciment, les produits de silicate, [3].

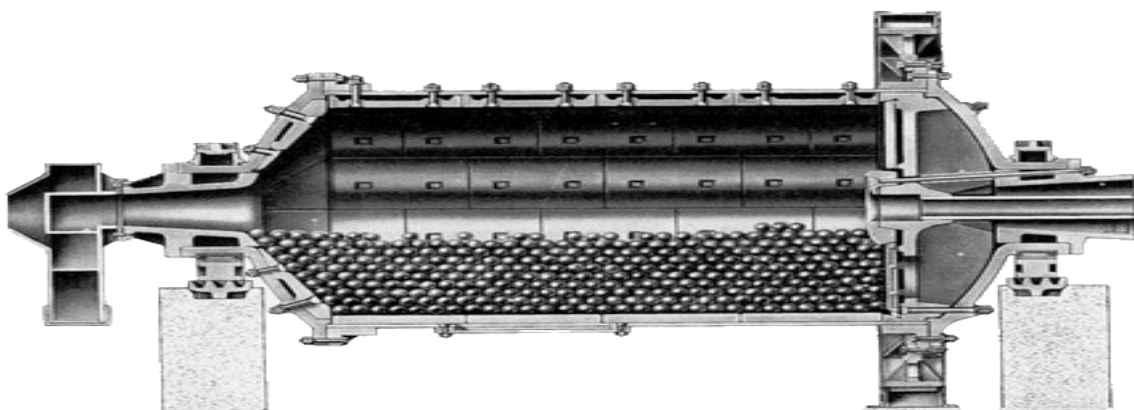


Figure 1.13: Broyeur à boulets.

1.2.6 Broyeur à galets :

Le broyeur à galet de type vertical est un équipement adéquat pour le broyage et le séchage des matériaux humides tel que le ciment. Le broyage et le séchage peuvent être réalisés de manière très efficace avec une seule machine. Plusieurs matériaux peuvent être broyés dans les broyeurs verticaux à galets : ciment, cru, charbon, pouzzolane. Le broyeur à galets de type vertical réalise 4 fonctions principales dans une seule machine : le broyage, le séchage, la séparation, le transport.

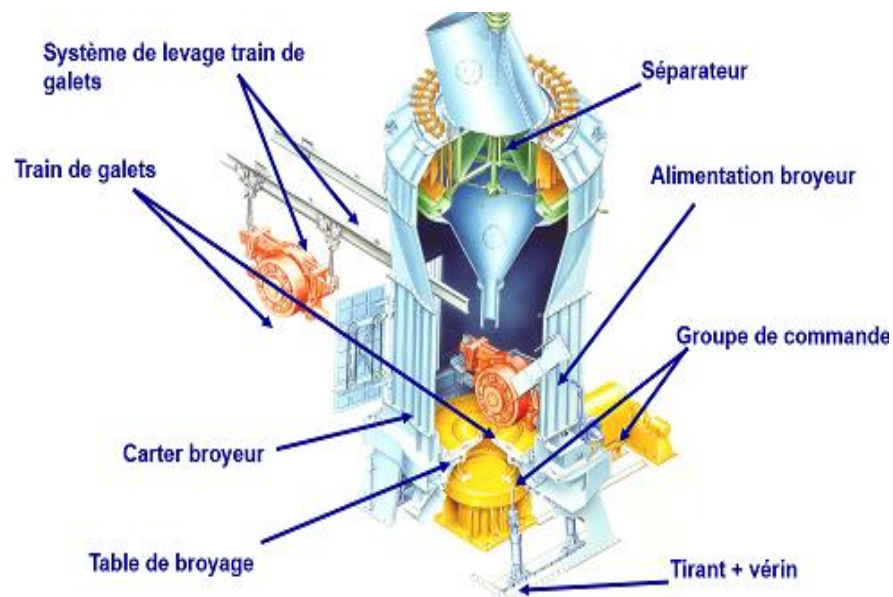


Figure 1.14: Broyeur à galets.

Chapitre 2 : Analyse des défaillances du broyeur à boulets

Le deuxième chapitre portera sur l'analyse fonctionnelle du broyeur à boulets ainsi celle des défaillances du broyeur, nous y développerons en premier temps une analyse AMDEC, pour déterminer les typologies de défaillances, leurs causes et leurs criticités.

Après avoir déterminé les pannes critiques, on va les analyser en se basant sur des mesures existantes, les résultats obtenus vont justifier la criticité des pannes choisies, et peuvent être bénéfique par la suite si on veut les comparer avec les résultats après amélioration.

Enfin, en identifiant la totalité des causes derrière ces pannes, on va lancer un plan d'action qui prend en considération toutes ces causes citées, et qui peut être réalisable durant cette période.

2.1 Analyse fonctionnelle :

L'analyse fonctionnelle est une démarche dont le but est de répondre à un besoin. L'objectif de ce travail est l'optimisation des performances du broyeur ciment. Nous allons donc présenter dans ce qui suit, les différentes fonctions que doit réaliser notre système pour atteindre cet objectif. On distingue deux types d'analyse fonctionnelle :

L'analyse externe : Analyse du point de vue utilisateur du produit à analyser et qui s'intéresse uniquement aux fonctions externes de celui-ci comme exemple le diagramme bête à cornes.

L'analyse interne : Analyse du point de vue concepteur chargé de concevoir ou réaliser le produit, l'analyse consiste à passer des fonctions de service aux fonctions techniques permettant de les concrétiser, [5].

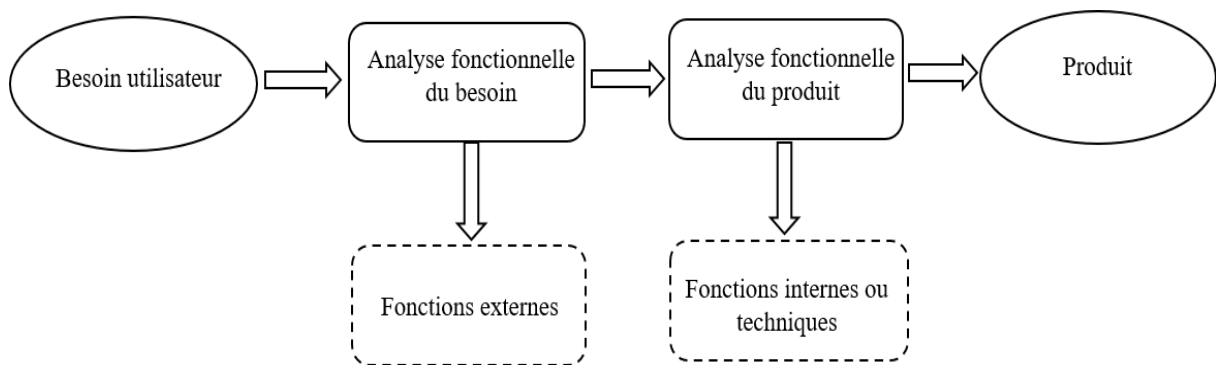


Figure 2.1: Processus d'analyse fonctionnelle

2.1.1 Analyse fonctionnelle externe du système :

2.1.1.1 Etude de besoin :

« Le tableau 2.1 » exprime un contrôle qui valide le besoin des cimenteries d'un broyeur à boulets pour obtenir du ciment.

Questions		Réponses
Pourquoi ce besoin existe-t-il ?	But	<ul style="list-style-type: none"> Obtenir la poudre de ciment en vue de la fabrication des produits dérivés pour l'alimentation.
	Raison	<ul style="list-style-type: none"> Permettre aux entreprises de transformation et aux particuliers à broyer des produits secs plus rapidement qu'avec les méthodes traditionnelles et machines couramment utilisées.
Qu'est ce qui pourrait le faire évoluer ?		<ul style="list-style-type: none"> Analyse des typologies de dégradation de ses sous-systèmes et proposition des pistes d'amélioration de la conception ou l'exploitation.
Qu'est ce qui pourrait le faire disparaître ?		<ul style="list-style-type: none"> Installation industrielle avec une grande capacité de production élevé.
<i>Le besoin est validé !</i>		

Tableau 2.1: Contrôle de validation du besoin

2.1.1.2 Bête à cornes :

La figure ci-dessous présente le diagramme de bête à cornes du broyeur à boulets.

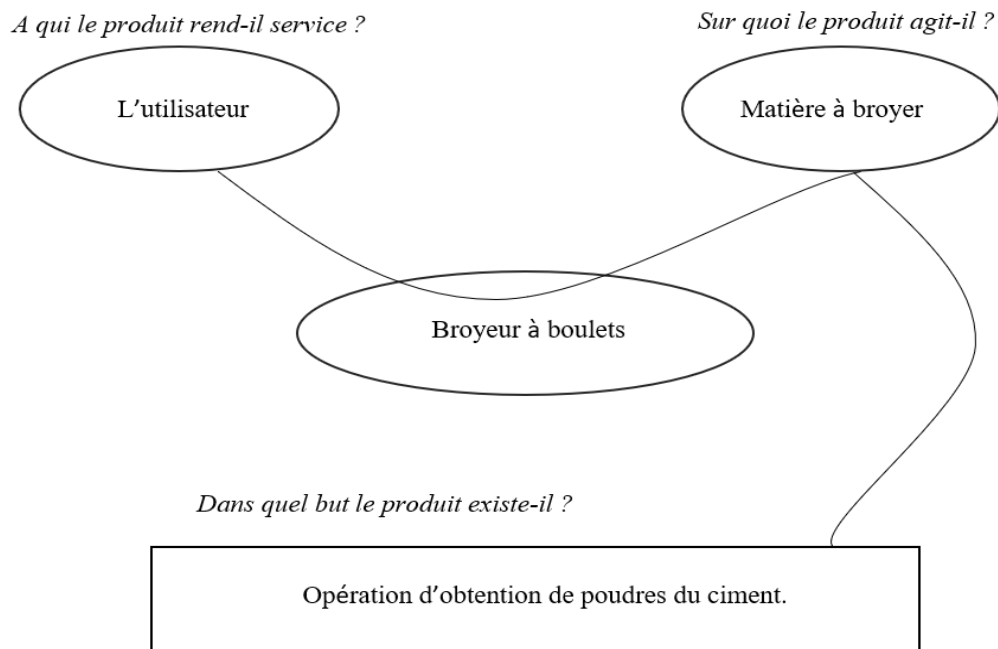


Figure 2.2: Diagramme de bête à cornes du système

2.1.2 Analyse fonctionnelle interne du système :

Dans cette partie, nous allons dégager les éléments constituant l'environnement externe, et ceci pour les différentes phases de vie. Pour ce faire, nous utilisons le diagramme Pieuvre qui a pour but la visualisation des fonctions principales et des fonctions contraintes.

2.1.2.1 Diagramme pieuvre :

Diagramme Pieuvre est également connu sous le nom de diagramme des interacteurs, il permet de définir la liaison entre le système et son environnement externe, c'est ainsi qu'il recense les fonctions de service, qui sont soit des fonctions principales soit des fonctions de contraintes.

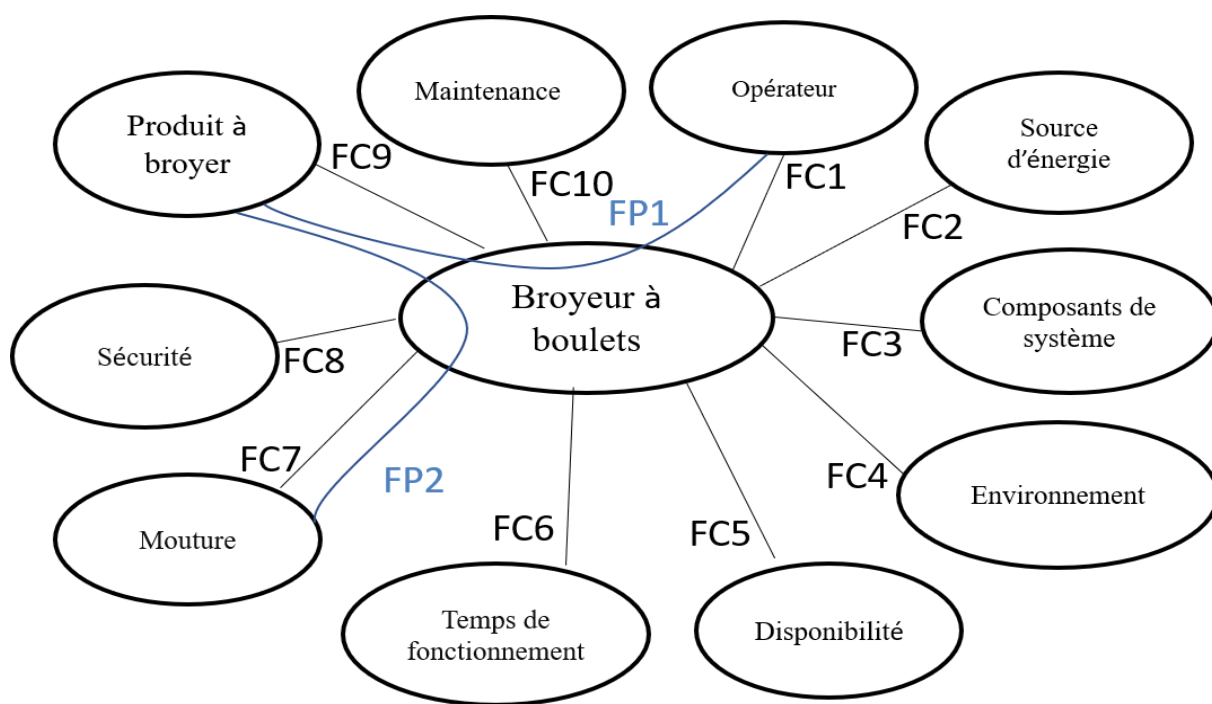


Figure 2.3: Diagramme pieuvre du système

On a recensé 2 fonctions principales, comme il est présenté dans « la figure 2.3 », qui mettent en évidence les fonctions primordiales de l'utilisation d'un broyeur qui mettent en relation, d'une part, la matière première avec le système et d'autre part le produit fini avec le système.

Les caractéristiques des fonctions de service sont données dans « le tableau 2.2 » :

Fonction	Description
FP1	Contrôler le débit d'alimentation des produits à broyer
FP2	Broyer plus rapidement et plus efficacement les produits secs afin d'obtenir de la poudre
FC1	Être facilement manipulable par l'utilisateur
FC2	S'adapter à la source d'énergie disponible
FC3	Être disponible sur le marché
FC4	Respecter l'environnement sociotechnique (bruit, poussière)
FC5	Utiliser des matériaux locaux
FC6	Avoir une durée de fonctionnement maximale
FC7	Respecter la granulométrie désirée
FC8	Respecter les normes de sécurité
FC9	Être économique
FC10	Être facilement maintenable (prévoir une maintenance préventive)

Tableau 2.2: Caractéristiques des fonctions de service

2.2 Orientation du sujet :

2.2.1 Description du sujet :

Pendant le fonctionnement, le réducteur principal qui fait partie du groupe de commande du broyeur ciment (type : Broyeur à boulets) subit des vibrations importantes, causant l'endommagement rapide de ces roulements, chose qui exige des interventions préventives et correctives continues. Ces interventions prolongent la durée de vie du réducteur mais en même temps engendrent des pertes économiques importantes (cout de maintenance élevé).

2.2.2 Problématique et démarche de résolution :

L'endommagement rapide des roulements du réducteur est un problème grave puisqu'il affecte l'état de ce dernier (élément couteux) et la disponibilité du broyeur ciment. La résolution de ce problème pendant la période de stage est impossible, cependant la proposition des solutions d'amélioration optimales et réalisables au futur reste souhaitable. Pour ce faire on doit répondre à ces deux questions :

- Quelles sont les causes racines de la dégradation de l'état du réducteur ?
- Comment peut-on minimiser la dégradation ?

Pour répondre à ces questions, nous allons effectuer une analyse AMDEC, qui sert à définir la nature et les causes des pannes au niveau du broyeur ciment en désignant parmi lesquelles ont une relation directe avec l'endommagement des roulements.

Ensuite, on va chercher des solutions pour les problèmes trouvés afin de minimiser les taux d'arrêt et améliorer les performances du broyeur.

2.2.3 Planning des tâches prévus :

Le tableau ci-dessous présente le planning des tâches effectuées pendant la période du stage.

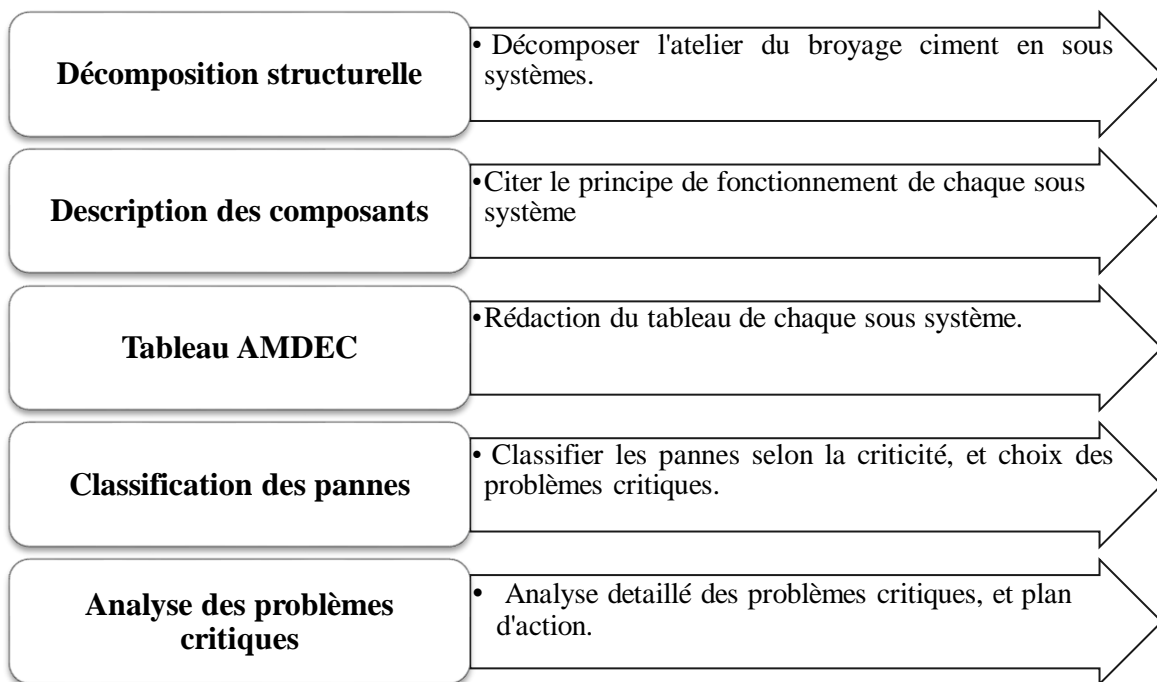
Planning	Période
Découvrir l'organisme d'accueil (création, sites, capacité de production)	Du 16/03/2022 à 18/03/2022
Comprendre les procédés d'élaboration du ciment : Découvrir les différents ateliers de l'entreprise, les étapes d'élaboration du ciment	Du 19/03/2022 à 21/03/2022
Lire la documentation du broyeur ciment : Découvrir ses composants, ses types et leur principe de fonctionnement	Du 21/03/2022 à 25/03/2022
Familiarisation avec l'entreprise <ul style="list-style-type: none"> • Visiter l'atelier broyage ciment • Visiter les autres équipements d'usine 	Du 28/03/2022 à 28/05/2022
Elaboration du cahier des charges	Du 28/03/2022 à 01/04/2022
Assister à la période de GE (grand entretien) <ul style="list-style-type: none"> • Vidange des centrales hydrauliques • Changement du blindage broyeur • Ajout charge broyant • Application céramique sur le casing du séparateur 	Du 04/05/2022 à 13/05/2022
Effectuer l'analyse AMDEC du broyeur ciment : <ul style="list-style-type: none"> • Causes et effets de défaillance • Calcul de coefficient de criticité • Etude de la criticité 	Du 02/04/2022 à 15/04/2022
Recherche des solutions possibles d'amélioration	Du 20/05/2022 à 05/06/2022
Finalisation du rapport et préparation de la soutenance	10 à 15 jours avant la soutenance !!!
Rédaction du rapport	Du 01/04/2022 à 30/06/2022

Tableau 2.3: Planning de travail

2.3 Analyse AMDEC des équipements de l'atelier broyage ciment :

L'AMDEC est un outil puissant de la gestion et d'optimisation de la maintenance. Il étudie les modes de défaillance des éléments névralgiques du système afin de permettre aux décideurs de déterminer les actions de maintenance adéquates à chaque situation. Tout au long de cette partie, nous allons appliquer cette méthode sur le broyeur à boulets. Cette analyse AMDEC est effectuée en concertation avec les opérateurs vus qu'on n'a pas un historique des pannes sur place ainsi que l'utilisation des différents plans techniques, [6].

Démarche à suivre :



2.3.1 Décomposition structurelle :

La décomposition structurelle consiste à diviser la machine en sous-système et les sous-systèmes en composants, l'objectif derrière cette étape est de comprendre la structure du système. « La figure 2.4 » montre la décomposition structurelle du broyeur à boulets.

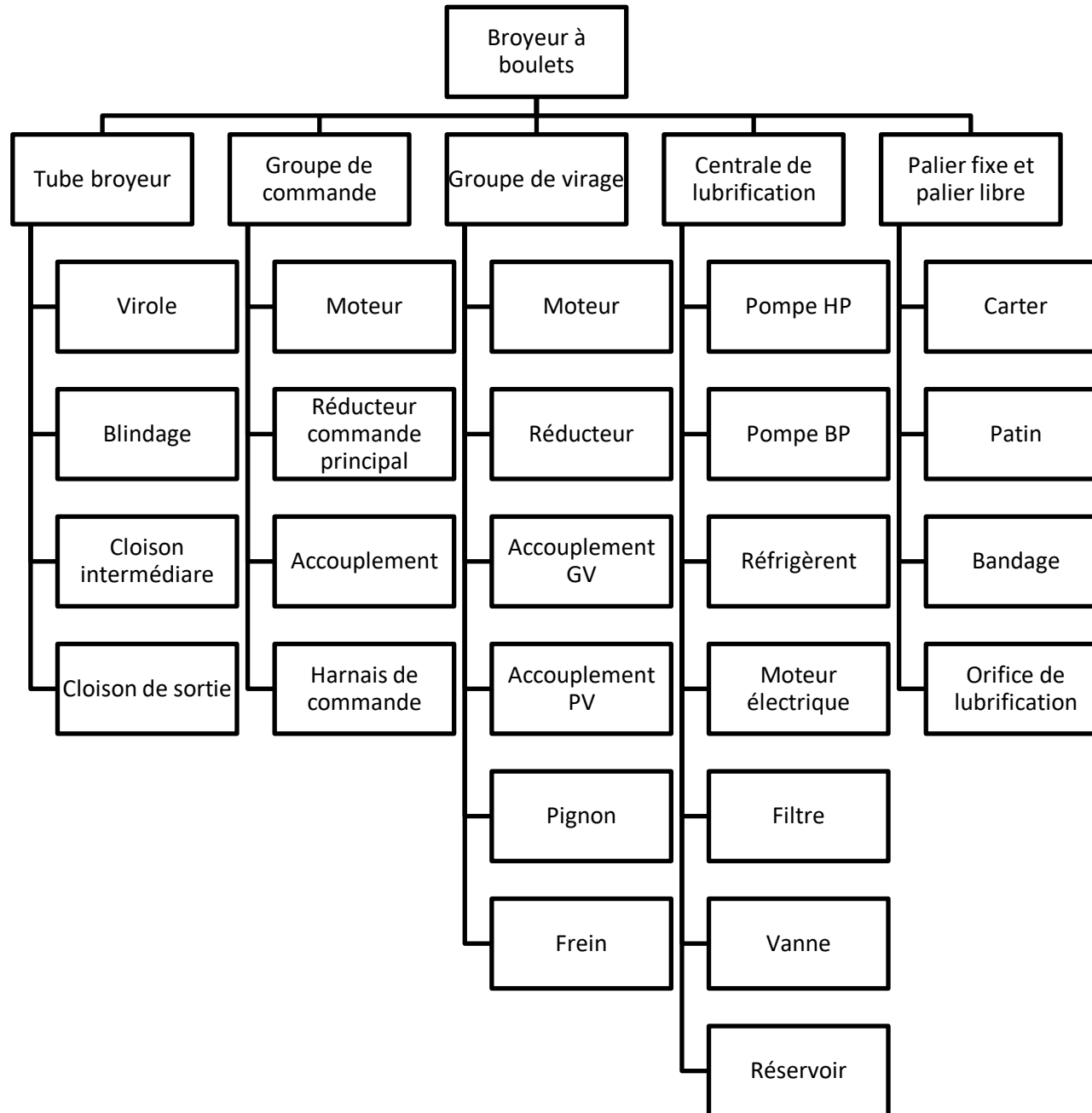


Figure 2.4: La décomposition structurelle du broyeur à boulets

2.3.2 Description des composants du broyeur à boulets :

2.3.2.1 Tube broyeur :

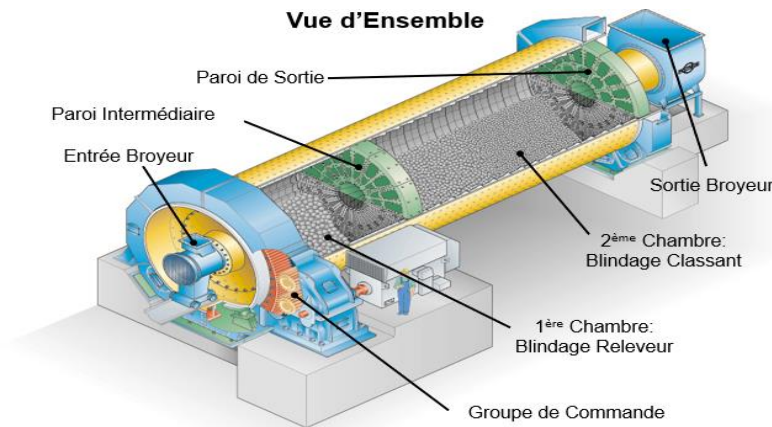


Figure 2.5: Vue d'ensemble du broyeur

Comme il apparaît dans « la figure 2.5 », le tube broyeur est composé des sous-ensembles suivants :

- ❖ Une virole qui est sous forme d'un cylindre métallique dont le diamètre égale à 4.4 m et de longueur de 14.7 m et qui tourne avec une vitesse de 15.37 t/min. Elle est divisée en deux compartiments, la première est remplie par des boulets en acier de diamètre allant de 45 mm jusqu'à 90mm et la deuxième qui est remplie des boulets de diamètre entre 40 mm et 15mm.
- ❖ Des plaques de blindage qui protègent la virole contre les forces d'impact causées par l'élévation continue des corps broyant (boulets) ainsi contre l'usure par frottement entre les corps broyant, le matériau et les plaques de blindage.
- ❖ Une cloison intermédiaire qui est sous forme d'une plaque métallique séparant les deux compartiments du broyeur. Elle est constituée d'une structure segmentée dont la partie centrale possède une zone de section libre suffisante pour le passage de l'air de ventilation, elle assure les fonctions suivantes :
 - Retenir la charge broyant dans les compartiments respectifs de broyage.
 - Réguler le flux, le niveau et le temps de séjour du matériau dans les compartiments.
 - Transférer le matériau d'un compartiment à l'autre.
 - Eviter le passage du matériau mal concassé d'un compartiment de broyage à l'autre.
- ❖ Une cloison de sortie qui a pour fonction :
 - Contrôler le débit du passage de la matière.

- Assurer un temps de rétention de la matière suffisant.
- Retenir la charge en boulet dans la 2^{ème} chambre.

2.3.2.2 Groupe de commande :

Le système de commande COMBIFLEX représenté dans « la figure 2.6 », réduit le nombre de pièces au minimum tout en créant un système compact à entretien aisé. Le palier à patin avec bandage ainsi que la couronne dentée et le réducteur principal forment une unité. La couronne dentée est directement boulonnée sur la bride du bandage. Cet ensemble est réuni sous un carter commun et est alimenté par un groupe de lubrification pour le réducteur et le palier fixe. Le carter du réducteur principal n'est pas fermé. Le dernier train d'engrenage est constitué par deux pignons d'attaque flottants qui s'engrènent directement dans la couronne dentée, [6].

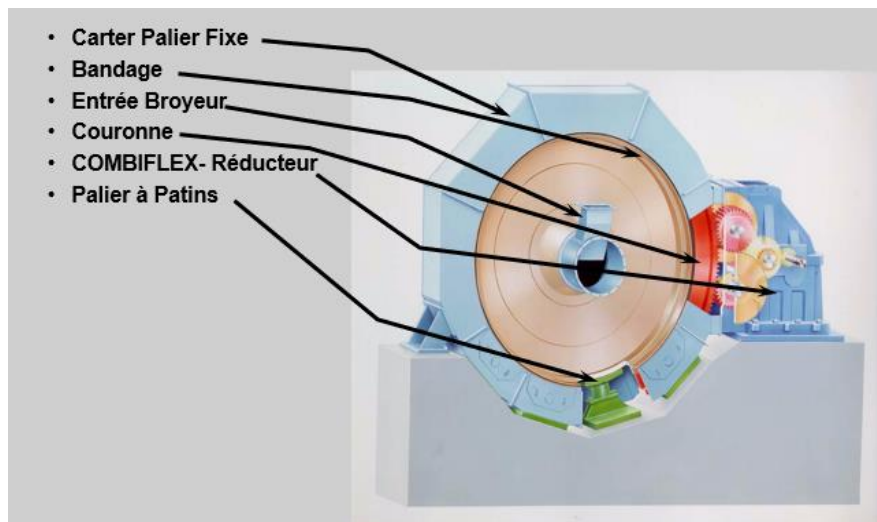


Figure 2.6: Arrangement broyeur coté commande.

2.3.2.3 Palier fixe et palier libre :

« La figure 2.7 » représente les différentes parties du palier à patin, ce dernier travaille selon le principe d'un palier lisse. C'est-à-dire qu'il assure un guidage en rotation par glissement. Le patin comme le montre « la figure 2.8 » comporte à sa face supérieure, juste après le bord d'entrée, une rainure transversale pour la lubrification à basse pression et au-dessus du centre d'appui, un trou alésé et une surface usinée pour la lubrification à haute pression. Pendant l'exploitation, il n'y a pas de contact entre le patin, et le bandage. Via le palier axial à rotule, le patin s'appuie sur la chaise-palier. Le patin s'adapte parfaitement au bandage grâce au mouvement au mouvement engendré par le palier à rotule. Le carter protège les patins et surfaces de roulement contre les poussières et les impuretés, tout en servant de bac à huile muni d'un tuyau de raccordement pour le retour d'huile vers le groupe de lubrification.

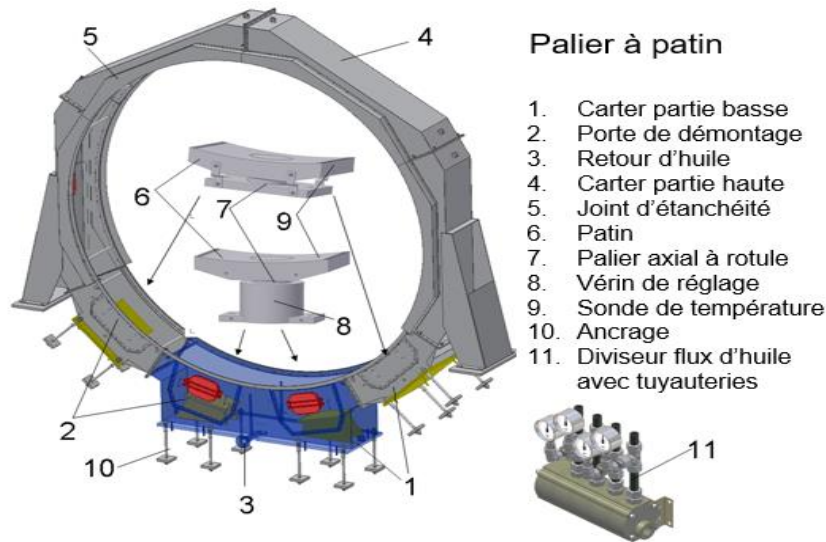


Figure 2.7: Palier à patin.

Lors du démarrage du broyeur, l'huile est injectée à haute pression au centre du patin permettant le décollage du broyeur. L'huile alimentée en basse pression dans la rainure transversale est entraînée par la rotation du bandage, dans l'écartement entre le patin et le bandage. Il se forme automatiquement une pression hydrodynamique dans le film d'huile qui supporte la charge et tant que la rotation continue, empêche le contact métallique entre les surfaces du roulement.

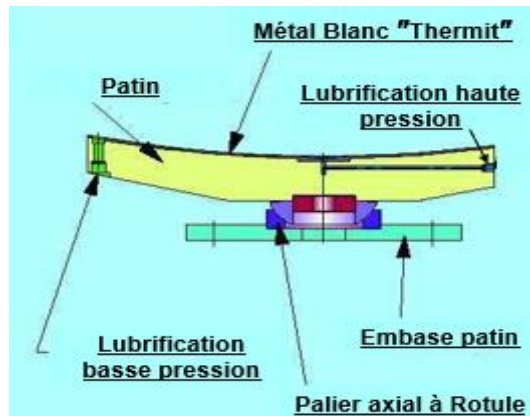


Figure 2.8: Patin Hydrodynamique.

2.3.2.4 Centrale de lubrification :

Le broyeur repose sur deux paliers comportant des coussinets. Vu son poids assez important (environ 145 tonnes), il faut lui assurer une bonne lubrification. C'est le premier rôle joué par la centrale de lubrification du broyeur (figure 2.9) qui est composée de :

- **Un circuit basse pression** (partie rouge) composé d'une pompe BP à huile de circulation et d'un échangeur. La pompe fonctionne pour faire circuler de l'huile dans

le palier, leur marche est contrôlée en continu par deux détecteurs de passage d'huile ainsi de deux filtres du lubrifiant et l'échangeur permet le refroidissement d'huile.

- **Un circuit haute pression** (partie bleue) composé d'une pompe HP à huile de démarrage. Quand elles fonctionnent, elles envoient de l'huile entre les coussinets et leurs paliers respectifs, ceci dans le but de soulever légèrement le broyeur.
- **Un circuit de recirculation** (partie jaune) composé d'une pompe à huile et un filtre. Elle assure la filtration et la recirculation du lubrifiant.
- **Un circuit de retour d'huile** (partie verte) qui permet le retour du lubrifiant au réservoir.

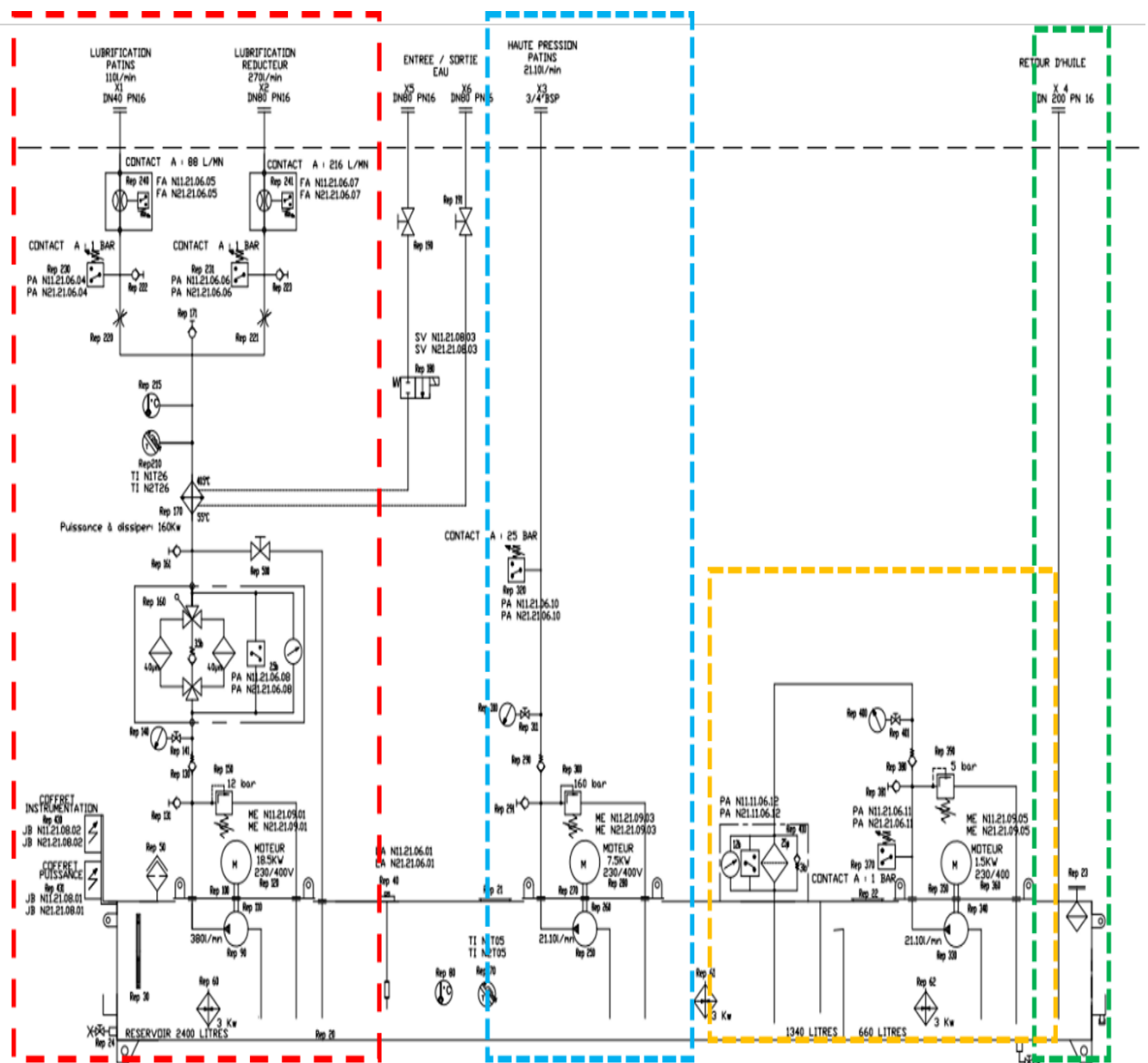


Figure 2.9: Schéma hydraulique.

Le deuxième rôle joué par la centrale c'est la lubrification du réducteur, un système de tuyauteries situé à l'intérieur du groupe de commande alimente les dentures et palier à roulement du réducteur principal comme le montre « la figure 2.10 ».

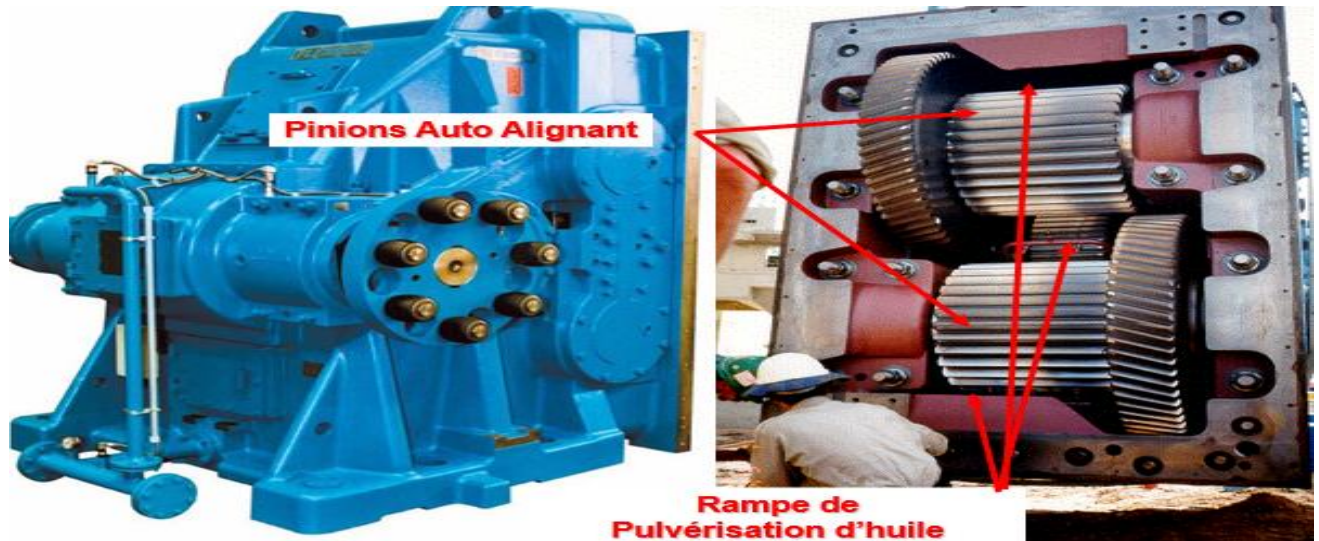


Figure 2.10: La lubrification du réducteur COMBIFLEX.

2.3.2.5 Groupe de virage :

Il est utilisé lors des travaux d'entretien pour tourner le broyeur à une petite vitesse. Il ne peut tourner qu'en mode local et seulement si le broyeur est à l'arrêt et désaccouplé. Le groupe de virage est composé d'un moteur vireur, d'un réducteur qui fournit en sortie une vitesse réduite et d'un dispositif d'embrayage.

2.3.3 Tableau AMDEC :

Afin de déterminer les modes de défaillance, les causes, les effets et les criticités, nous avons fait un brainstorming avec les agents de maintenance de l'atelier du broyage ciment pour se mettre d'accord sur toutes les données fiables à utiliser.

Concepts généraux

L'AMDEC impose d'avoir des critères d'évaluation à savoir :

- Gravité : G.
- Détectabilité : D.
- Occurrence : F.

La criticité est définie comme étant le résultat du produit des trois composantes citées. La cotation des trois indices F, G, D varie de 1 à 5, les tableaux 2.4, 2.5 et 2.6 montrent la signification des chiffres pour chaque indice :

Gravité :

Cotation	Signification	Nombre d'heures d'arrêts
1	Très peu grave	Arrêt de production inférieur à 3 minutes.
2	Peu grave	Arrêt de production de 3 à 20 minutes, au report possible d'intervention.
3	Moyennement grave	Arrêt de production de 20 à 60 minutes.
4	Très grave	Arrêt de production de 1 à 2 heures.
5	Extrêmement grave	Arrêt de production supérieur à 2 heures.

Tableau 2.4: Cotation de l'indice de gravité

Déteçtabilité :

Cotation	Signification
1	Visuelle à coup
2	Visuelle après l'action de l'opérateur
3	Moyennement déteçtable
4	Difficilement déteçtable
5	Non déteçtable

Tableau 2.5: Cotation de l'indice de déteçtabilité

Fréquence

Cotation	Signification	Fréquence
1	Très faiblement fréquent	Une fois par ans
2	Faiblement fréquent	Une fois par 6 mois
3	Moyennement fréquent	Une fois par 3 mois
4	Très fréquent	Une fois par semaine
5	Extrêmement fréquent	Deux fois par semaine

Tableau 2.6: Cotation de l'indice de fréquence

Evaluations de la criticité

Niveau de la criticité	Action corrective
$1 < C \leq 10$	Maintenance corrective
$10 < C \leq 20$	Maintenance préventive
$20 < C \leq 40$	Révision de conception et amélioration, maintenance préventive prévisionnelle
$40 < C < 64$	Changement totale de la conception

Tableau 2.7: Evaluation de la criticité

Formule de la criticité :

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

AMDEC/Tube broyeur :

AMDEC : Analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leurs criticités										
Système : broyeur à boulets										
Sous système : tube broyeur										
Composant	Fonction	Modes de défaillance	Causes	Effets	Démarche de détection	Notes				Action
						D	G	F	C	
Virole	Fixation des pièces d'usure	Fissure/déformation/boulons desserrés	Fatigue/usure blindage	Fuite matière	Visuelle	3	5	1	15	Maintenance préventive (Contrôle au ressuage sur les soudures)
Blindage	Protéger la virole contre l'abrasion	Usure par fatigue	Fatigue/marche à vide	Fuite matière	Mesure de redent	2	5	2	20	Contrôler l'état et relever l'usure des blindages des 2 compartiments
Cloison intermédiaire	Servir le passage de la matière issue de la chambre1	Usure des blindages Grille bouchée	Choc boulet/marche à vide/fatigue	Mauvaise broyage. Bourrage du chambre1	Visuelle	2	5	2	20	Contrôler l'état et relever l'usure des grilles Contrôler l'usure des boulons de fixation des grilles et plaques
Cloison de sortie	Evacuer le produit broyé vers le séparateur	Usure des blindages Grille bouchée	Choc boulet/marche à vide/fatigue	Beaucoup de refus Production réduite	Visuelle	2	5	2	20	Contrôler l'état et relever l'usure des grilles Contrôler l'usure des boulons de fixation des grilles et plaques
Boulon de serrage	Assurer la fixation du blindage	Desserrage	Mauvais serrage	Fuite matière	Visuelle	1	1	3	3	Maintenance corrective (serrer les boulons)

AMDEC/Palier fixe et palier libre :

AMDEC : Analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leurs criticités										
Système : broyeur à boulets										
Sous système : Palier fixe et palier libre										
Composant	Fonction	Modes de défaillance	Causes	Effets	Démarche de détection	Notes				Action
						D	G	F	C	
Carter	Protéger bandage +patin	Usure/étanchéité plan de joint	Boulon desserré/fissure	Fuite d'huile	Visuelle	2	5	1	10	Maintenance corrective
Patin	Guidage tube broyeur	Usure	Frottement	Elévation température	Sonde T	2	5	2	20	Maintenance préventive (contrôler l'état externe et fixation des patins, contrôler la fixation des sondes de température)
Orifice de lubrification	Injection d'huile	Bouchage	Mauvaise filtration	Elévation température	Sonde/ Elévation P	2	5	2	20	Maintenance préventive
Bandage	Support de tube broyeur	Usure	Absence film d'huile	Elévation température	Sonde/ Elévation P	2	5	2	20	Maintenance préventive (contrôler l'état du bandage)

AMDEC/Groupe de virage :

AMDEC : Analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leurs criticités										
Système : broyeur à boulets										
Sous système : Groupe de virage										
Composant	Fonction	Modes de défaillance	Causes	Effets	Démarche de détection	Notes				Action
						D	G	F	C	
Moteur	Entrainement du tube broyeur	Cramage moteur	Pas d'alimentation	Difficulté de positionnement de broyeur	Visuelle	2	2	1	4	Maintenance corrective
			Absence de commande							
Réducteur	Réduire la vitesse et transmettre la puissance	Détérioration des dents Endommagement des roulements	Fatigue/vibration/ manque de lubrifiant	Vibration Mauvais fonctionnement	Bruit Échauffement	2	2	1	4	Maintenance corrective
Accouplement GV	Transmettre la puissance au réducteur	Usure des tampons	Défaut d'alignement Usure des paliers lisses du réducteur Fatigue	Usure des logements de tampons Contact métal/métal Vibrations	Sonde/ Elévation P	2	2	1	4	Maintenance corrective
		Rupture des axes	Désalignement	Vibration/arrêt réducteur	Mesure Vibratoire	2	2	1	4	Maintenance corrective
Accouplement PV	Transmettre la puissance broyeur	Défaillance de système d'accouplement	Desserrage des vis d'assemblage Surcharge Fatigue Désalignement	Mauvaise transmission Usure des paliers	Mesure Vibratoire	2	2	1	4	Maintenance corrective
Pignon	Transmettre le couple PV à la couronne	Usure/cassure des dents	Mauvais graissage/mauvais montage/fatigue	Mauvais engrènement avec couronne	Visuelle	2	2	1	4	Maintenance corrective
Frein	Arrêter la transmission	Retard freinage	Usure garniture	Glissement/échauffement	Visuelle	2	2	1	4	Maintenance corrective

AMDEC/Groupe de commande :

AMDEC : Analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leurs criticités											
Système : broyeur à boulets											
Sous système : Groupe de commande											
Composant	Organe	Fonction	Modes de défaillance	Causes	Effets	Démarche de détection	Notes				Action
							D	G	F	C	
Moteur	Ventilateur	Refroidissement	Usure	Fatigue	Vibration	Suivie Vibratoire	3	4	1	12	Maintenance préventive
	Balais	Assurer le passage du courant entre le stator et le rotor	Usure	Coincement des balais dans leur gaine par les poussières	Echauffement/court-circuit	Mesure de la hauteur	2	5	1	10	Maintenance corrective
	Roulement	Guider l'arbre en rotation	Usure/cassure	Manque d'étanchéité/fatigue	Arbre bloqué/bruit	Suivie Vibratoire	2	5	1	10	Maintenance corrective
	Rotor	Assurer le mouvement de rotation	Portée d'arbre/Flasque palier usé/défaillance de la cage	Surcharge fatigue	Arrêt de compresseur	Mesure des vibrations	2	5	1	10	Maintenance corrective
	Stator	Créer un champ tournant	Grillage d'enroulement Défaillance de phase Défaillance d'isolement	Surcharge fatigue	Arrêt de compresseur	Visuelle	2	5	1	10	Maintenance corrective
	Carter	Protéger le moteur	Vibration excessive	Boulons desserrés	Séparation des parties du carter	Visuelle	2	2	1	4	Maintenance corrective
Réducteur commande principal	Palier arbre GV	Guidage en rotation du pignon d'attaque	Mauvais guidage	Roulements endommagés	Vibration	Mesure vibratoire	3	5	2	30	Maintenance préventive prévisionnelle
Accouplement		Transmission de couple moteur/réducteur	Défaillance de système d'accouplement	Désalignement	Vibration/bruit	Mesure vibratoire	2	5	2	20	Maintenance préventive (contrôle d'état et d'alignement)
Harnais de commande	Couronne	Entrainement tube broyeur	Usure dent Détérioration du pignon et couronne	Mauvaise lubrification	Vibration/échauffement/bruit	Mesure vibratoire	2	5	2	20	Maintenance préventive (contrôle d'état)
	Carter	Protéger le harnais	Vibration excessive	Boulon desserrés	Séparation des parties du carter	Visuelle	2	2	1	4	Maintenance corrective

AMDEC/Centrale de lubrification :

AMDEC : Analyse des modes de défaillances de leurs effets et de leurs criticités										
Système : broyeur à boulets										
Sous système : centrale de lubrification										
Composant	Fonction	Modes de défaillance	Causes	Effets	Démarche de détection	Notes				Action
						D	G	F	C	
Pompe HP	Assurer le levage de bandage sur les patins	Débit insuffisant	Usure de garniture Usure d'engrenage	Usure de palier ou bandage	Indicateur (affichage débitmètre)	2	4	3	24	Amélioration du circuit hydraulique
Pompe BP	Assurer la lubrification du broyeur + le réducteur	Débit insuffisant	Usure engrenage Fuite au niveau de canaux d'alimentation Usure de garniture	Echauffement de la pompe	Indicateur (affichage débitmètre)	2	4	3	24	Amélioration du circuit hydraulique
Réfrigèrent	Refroidir l'huile	Débit d'eau à la sortie réfrigèrent faible	Colmatage	Température élevée	Indicateur débitmètre	2	4	1	8	Maintenance corrective
Moteur électrique	Entrainer la pompe	Pas de rotation	Pas d'alimentation Absence de commande	Le broyeur ne démarre pas	Visuelle	3	4	1	12	Maintenance préventive
		Rotation inversée	Erreur de câblage							
Filtre	Filtrer le circuit contre l'impureté	Encrassement Mauvais filtrage	Présence d'impuretés diverses Détérioration du filtre	Colmatage	Visuelle	2	3	3	18	Maintenance préventive (Nettoyage et remplacement des cartouches filtrantes)
Vanne	Fermeture et ouverture du circuit de refroidissement d'huile	Coincement	Fatigue	Pas de circulation du lubrifiant	Thermomètre	2	2	1	4	Maintenance corrective
Réservoir	Stock d'huile	Fuite	Corrosion	Perte d'huile	Visuelle	5	2	1	10	Maintenance corrective

2.3.4 Classification des pannes :

Pour se concentrer sur les pannes les plus critiques on va classer les pannes selon l'ordre de criticité.

Sous système	Élément	Panne	Criticité
Groupe de commande	Réducteur	Endommagement des roulements	30
Centrale de lubrification	Pompe HP	Débit insuffisant	24
	Pompe BP	Débit insuffisant	24
Tube broyeur	Blindage	Usure excessive	20
	Cloison intermédiaire	Usure excessive	20
	Cloison de sortie	Usure excessive	20
Palier fixe et palier libre	Patin	Usure	20
	Orifice de lubrification	Bouchage	20
	Bandage	Usure	20
Groupe de commande	Accouplement	Défaillance du système d'accouplement	20
	Couronne	Détérioration des pignons et de la couronne	20
Centrale de lubrification	Filtre	Mauvais filtrage	18
Tube broyeur	Virole	Fissure/déformation	15
Groupe de commande	Ventilateur du moteur	Usure	12
Centrale de lubrification	Moteur électrique	Arrêt / mal fonctionnement	12
	Réservoir	Fuite	10
Groupe de commande	Balais du moteur	Usure	10
	Roulement du moteur	Usure	10
	Rotor du moteur	Usure	10
	Stator du moteur	Usure	10
Palier fixe et palier libre	Carter	Usure	10
Centrale de lubrification	Réfrigérant	Débit faible	4
Groupe de virage	Moteur	Cramage	4
	Réducteur	Détérioration des dents Endommagement des roulements	4
Groupe de commande	Carter du harnais du commande	Usure	4

Remarque :

D'après la classification on remarque que le problème le plus critique est la dégradation du réducteur principal du groupe de commande. Notre étude va se baser donc sur cette panne car elle a un impact sur les performances du broyeur.

Les autres pannes peuvent être réduites, en suivant les plans de maintenance préventive et corrective proposés.

2.3.5 Analyse des problèmes critiques :

Pour approfondir notre analyse sur la dégradation d'état du réducteur on va exploiter les données suivantes :

- Historique d'entretien du réducteur BK1.
- Historique d'analyses d'huile .
- Analyse vibratoire.
- Analyse du circuit hydraulique.

Dans ce qui suit on verra en détails l'objectif et les résultats de chaque donnée.

Constat :

Le département mécanique, enregistre une dégradation de réducteur COMBIFLEX BK1, cette dernière génère :

- Des entretiens coûteux.
- Pénalisation de la disponibilité du broyeur.
- Risques liés aux opérations de maintenance.

Afin de pouvoir désigner les causes racines de cette dégradation, on va analyser l'historique d'entretien de cet équipement qui se présente dans « la figure 2.11 » :

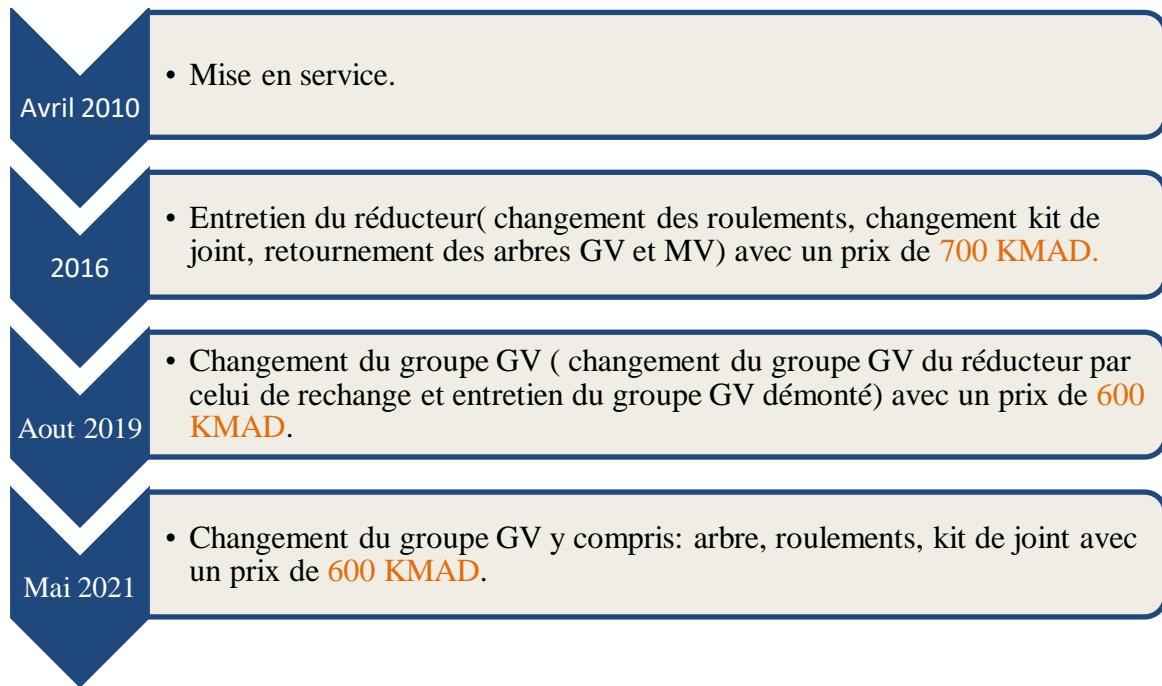


Figure 2.11: Historique d'entretien du réducteur

Une expertise faite avec FLENDER, entreprise spécialisée dans le secteur d'activité de la fabrication d'engrenages et d'organes mécaniques de transmission, montre que l'élément déclencheur de l'entretien de 2016 :

- Problème d'étanchéité et contamination de l'huile

Ce qui engendre des usures au niveau des roulements du réducteur comme le montre « la figure 2.12 ».



Figure 2.12: Roulement avec rayures et écaillages

Suite aux résultats obtenus avec cette entreprise et au problème de contamination de l'huile en poussière, CIMAT progresse à faire des analyses d'huile et des analyses vibratoires pour identifier l'évolution de ce problème afin de minimiser le niveau de la dégradation du réducteur.

2.3.5.1 Analyse d'huile :

L'analyse d'huile peut mettre en évidence la présence de contaminants, permettant de contrôler l'état mécanique général des machines lubrifiées (boîtes de vitesses, ponts, réducteurs, hydraulique, etc.)

L'historique d'analyse d'huile montre que :

- La quantité d'impuretés est toujours élevée (comptage de particules ne peut être effectué).
- La teneur en fer est légèrement élevée et l'indice de sévérité d'usure.

Pour cela CIMAT essaye de garantir une huile propre et sèche en utilisant des cartouches filtrantes qui sont spécialement conçues pour filtrer l'huile d'engrenages de broyeur ciment.

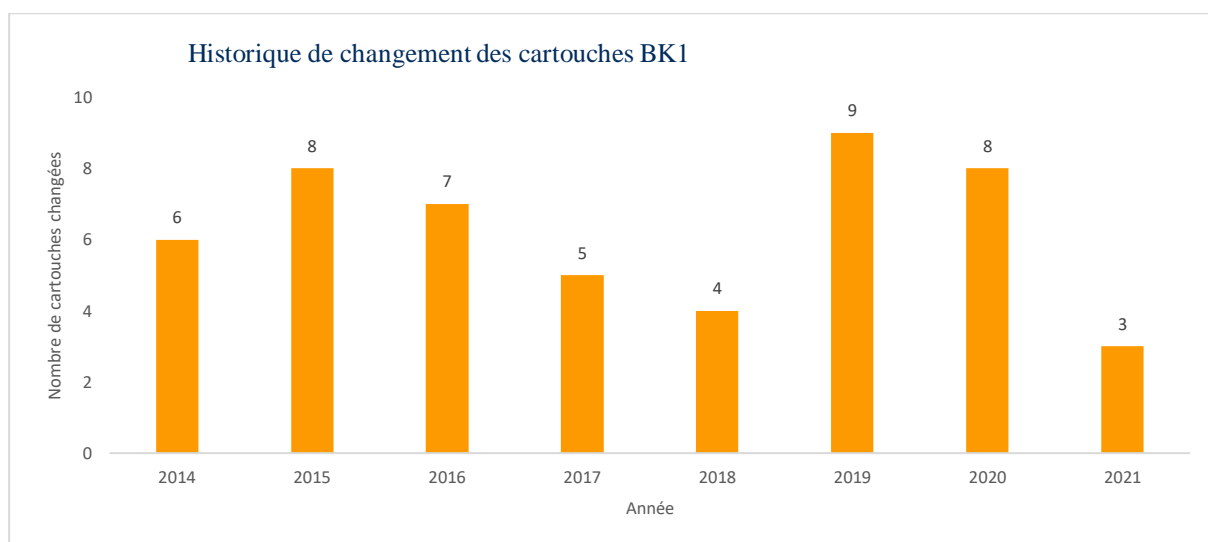


Figure 2.13: Historique de changement des cartouches BK1

« La figure 2.13 » montre que le taux de changement des cartouches filtrantes est très important, ce qui indique la gravité de ce problème.

2.3.5.2 Analyse vibratoire :

L'analyse vibratoire permet de diagnostiquer d'éventuelles pannes d'une machine, et de mettre des actions de maintenance. Elle mesure la résistance aux vibrations.



Figure 2.14: Les groupes GV, MV et PV du réducteur BK1

En ce qui suit, on va analyser l'historique des vibrations du groupe GV du réducteur présenté dans « la figure 2.14 » au niveau des accouplements 301 et 302.

Vibration groupe GV BK1

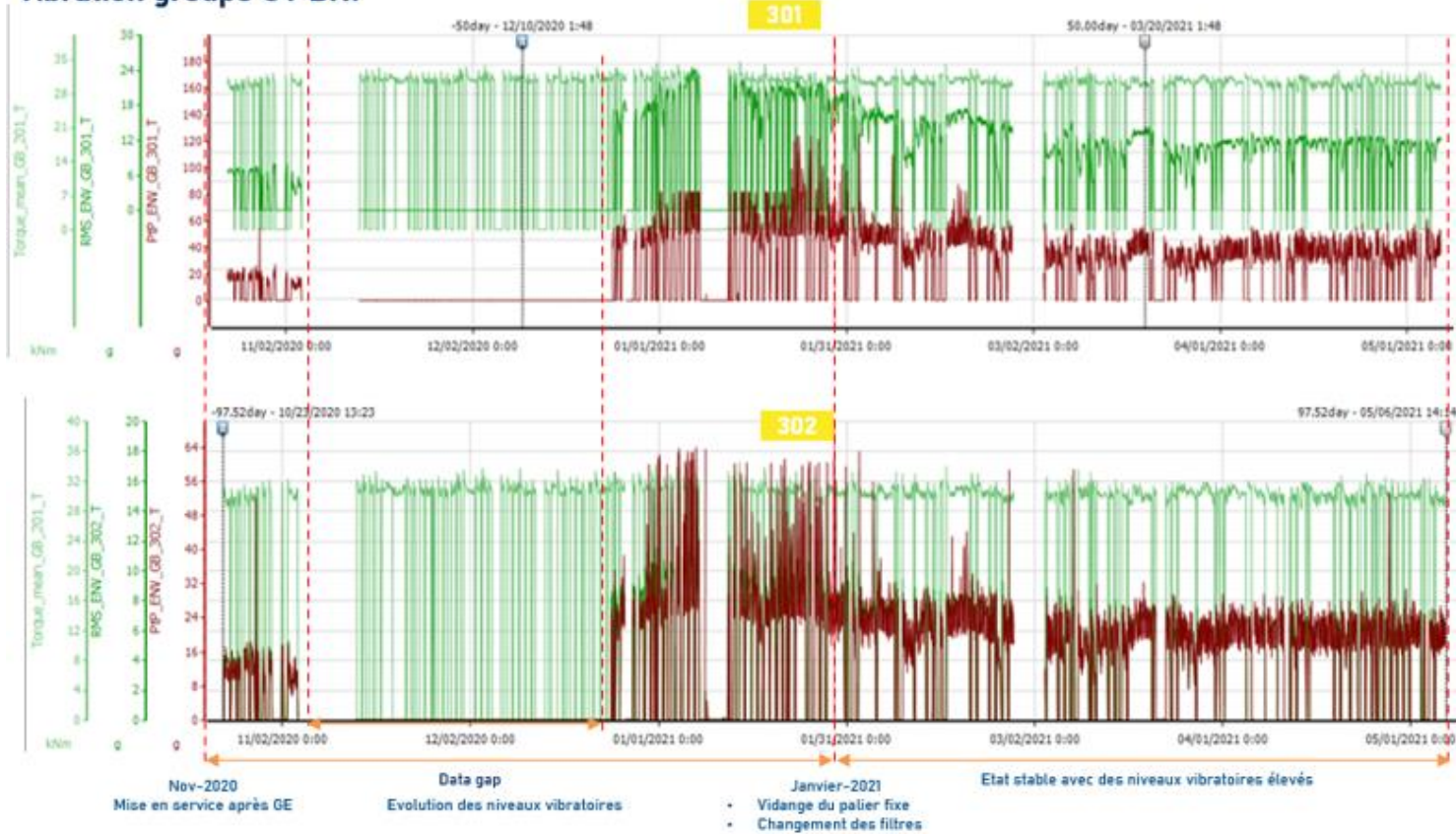


Figure 2.15: Historique de vibration du groupe GV au niveau des accouplements 301 et 302

Les résultats obtenus représentés dans « la figure 2.15 » montrent qu'en passant par la période de la mise en service après le grand entretien G.E les niveaux des vibrations ont augmenté d'une manière croissante mais après la vidange du palier fixe et le changement des filtres en janvier 2021 l'état de fonctionnement du réducteur est devenu stable mais avec des niveaux des vibrations élevés. En même temps les résultats d'analyse d'huile montrent qu'il y a une contamination d'huile en poussière, la teneur en fer est élevée ainsi la viscosité est égale à 436.5 cSt (centistokes). Par conséquent, malgré que les caractéristiques de lubrifiant reste inchangées, la qualité de lubrifiant est médiocre en terme de charge en poussières et à l'autre coté les roulements sont très sensibles à la poussière ce qui engendre un endommagement rapide de ces derniers.

2.3.5.3 Analyse du circuit hydraulique :

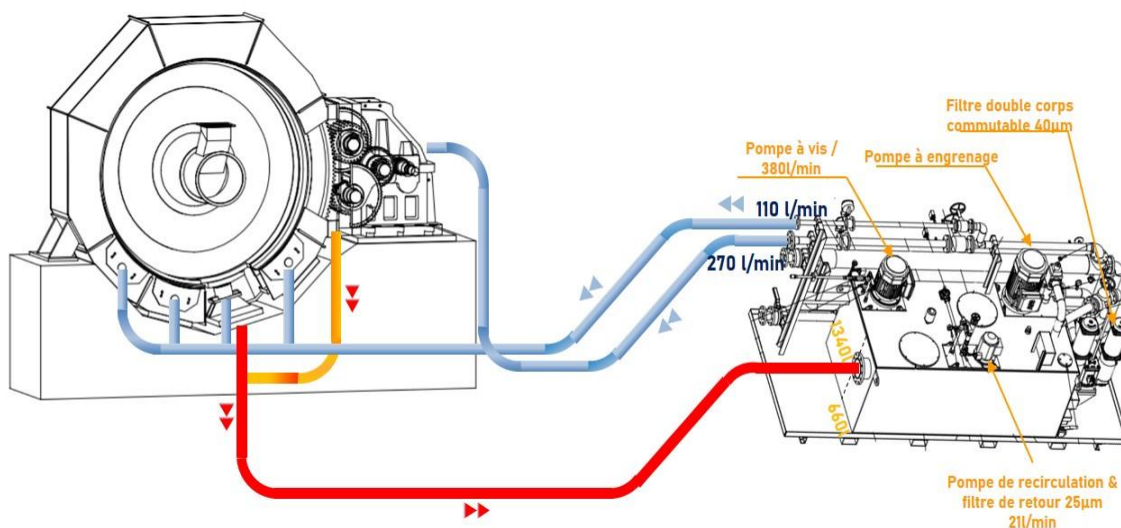


Figure 2.16: Centrale de lubrification

L'analyse de chaque élément de la centrale de lubrification montrée dans « la figure 2.16 » nous a permis de trouver que :

- Pour l'unité de stockage d'huile :
 - Le volume du réservoir d'huile de 2000L est trop petit pour le débit de fonctionnement.
 - Le temps de rétention pour la décantation des particules de poussières est très faible.
- ❖ Recommandation technique :
 - Le volume théorique de réservoir doit être supérieur à 3040 L soit 34% de plus.

$$V_{\text{réservoir}} \approx 7 \text{ à } 8 * Q_{\text{total}}$$

Avec Q_{total} c'est le débit total.

- Pour le circuit basse pression :
 - Le filtre principal a une capacité de filtration (40 μ m) est insuffisante pour les roulements (3 à 6 μ m).
- ❖ Recommandation :
 - Un bon fonctionnement des roulements nécessite un taux de filtration de 3 à 6 μ m.
- Pour le circuit haute pression :
 - Absence de filtration pour le circuit haute pression du palier.
- Pour le circuit de recirculation :
 - La capacité de la pompe de recirculation n'est que 21L/min, donc seul 06% du débit total d'huile passe par le filtre de retour.
 - 94% du retour passe directement vers la chambre d'aspiration.
- Pour le circuit de retour :
 - Absence de filtration.
 - Le joint de carter n'assure pas une étanchéité complète

Plan d'action :

Pour résoudre le problème de la contamination d'huile en poussière, on doit proposer une nouvelle solution basée sur la fermeture de la partie qui laisse passer les impuretés.

Pour remédier aux problèmes trouvés lors de l'analyse de la centrale hydraulique, on va proposer des solutions améliorant les performances de filtration de cette dernière.

Chapitre 3 : Proposition des solutions d'amélioration

Le troisième chapitre porte sur la proposition des solutions qui vont aider à régler le problème de la contamination d'huile en poussière, nous y proposons en premier temps l'introduction d'un carter au niveau de l'extrémité de la virole pour empêcher la poussière à entrer à l'intérieur du circuit de lubrification. Ensuite on va faire une analyse statique sur ce dernier, l'objectif de celle-ci est de voir le niveau de flexion du carter c'est-à-dire s'il va se déformer plastiquement ou s'il restera dans le domaine élastique.

Deuxièmement, nous cherchons des solutions techniques et palliatives pour améliorer la lubrification du réducteur et résoudre les problèmes découverts dans la partie d'analyse de la centrale hydraulique.

3.1 Introduction d'un carter anti poussière :

L'introduction de ce nouvel équipement va permettre à CIMAT d'éviter le problème de la dégradation de l'état du réducteur, celui-ci va assurer la propreté d'huile tout en empêchant la pénétration d'impureté et en même temps il va aider l'entreprise à éviter la détérioration des roulements du réducteur et les frais de maintenance coûteux.

Avant la réalisation, il faut d'abord faire une analyse statique du carter. L'objectif principal de cette analyse est d'évaluer l'état de stress dont elle est généralement effectuée dans le but d'explorer les caractéristiques de conception adoptées contre le critère de résistance. Le critère de résistance est généralement formulé comme suit :

La contrainte σ se développant dans une structure sous des forces externes appliquées doit être inférieure à la contrainte Sûre $[\sigma]$ pour le matériel de structure donné après l'application de la marge du facteur de sécurité K_{safe} .

$$\sigma * K_{safe} \leq [\sigma]$$

3.1.1 Analyse statique du carter :

Pour faire l'analyse statique du carter, on va utiliser le logiciel ANSYS (un programme de calcul par la méthode des éléments finis) en se basant sur l'algorithme présenté dans « la figure 3.1 » :

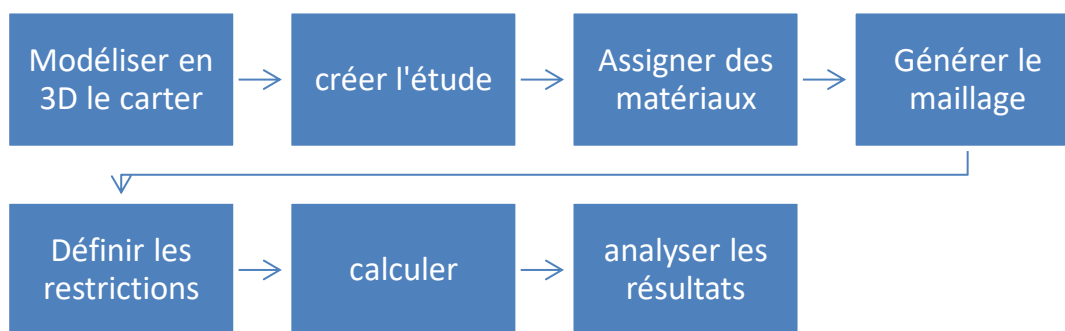


Figure 3.1: Algorithme d'analyse statique

3.1.2 Les étapes de simulation ANSYS :

Modélisation du système

Pour la partie de la modélisation, on a choisi de travailler avec le logiciel Catia comme il est montré dans « la figure 3.2 » pour dessiner le carter et les composants liant ce dernier avec le tube broyeur. On s'est basé sur le dessin d'ensemble du constructeur KRUPP POLYSIUS (voir annexe B).

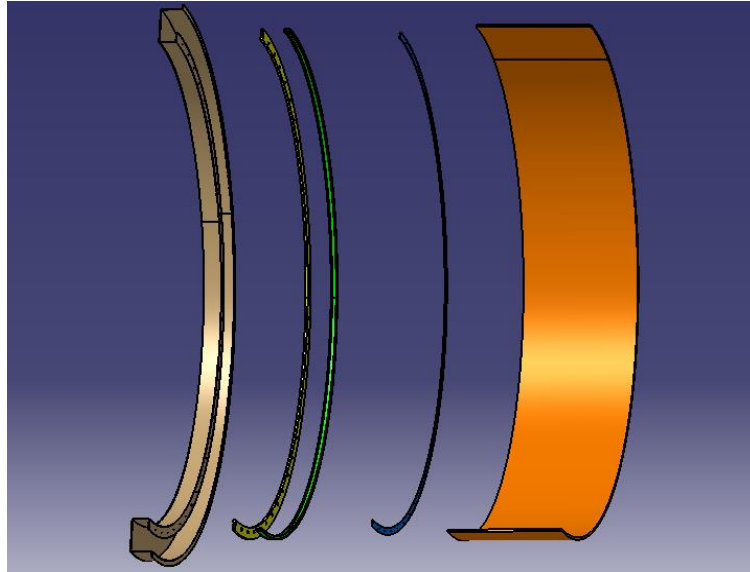


Figure 3.2: Une coupe du carter anti-poussière

Après la création de l'étude, on assigne au carter le matériau d'acier qui est un matériau très résistant aux chocs et de haute densité.

Les propriétés du matériau d'acier s'appliquent automatiquement au carter :

Module d'Young (MPa)	Contrainte élastique (MPa)	Contrainte rupture (MPa)	Poisson	Masse volumique (Kg /m ³)
$2 * 10^5$	250	460	0.3	7850

La simulation des contraintes par la méthode des éléments finis nécessite l'insertion de plusieurs données. Tel que les forces appliquées sur le carter, les parties de la pièce encastrée entre eux. Et puisque le carter est encastré avec la virole, les forces appliquées au carter seront son poids seulement.

Avant d'analyser les résultats, on va détailler dans ce qui suit les étapes suivies sur ANSYS pour effectuer l'analyse statique du carter (figure 3.3 et 3.4).

La méthode des éléments finis est basée sur la division de l'espace selon un maillage. Plus ce maillage est resserré plus la solution par la MEF sera précise. Le carter est modélisé par un maillage tridimensionnel. Ce dernier a été obtenu automatiquement à l'aide des options d'ANSYS.

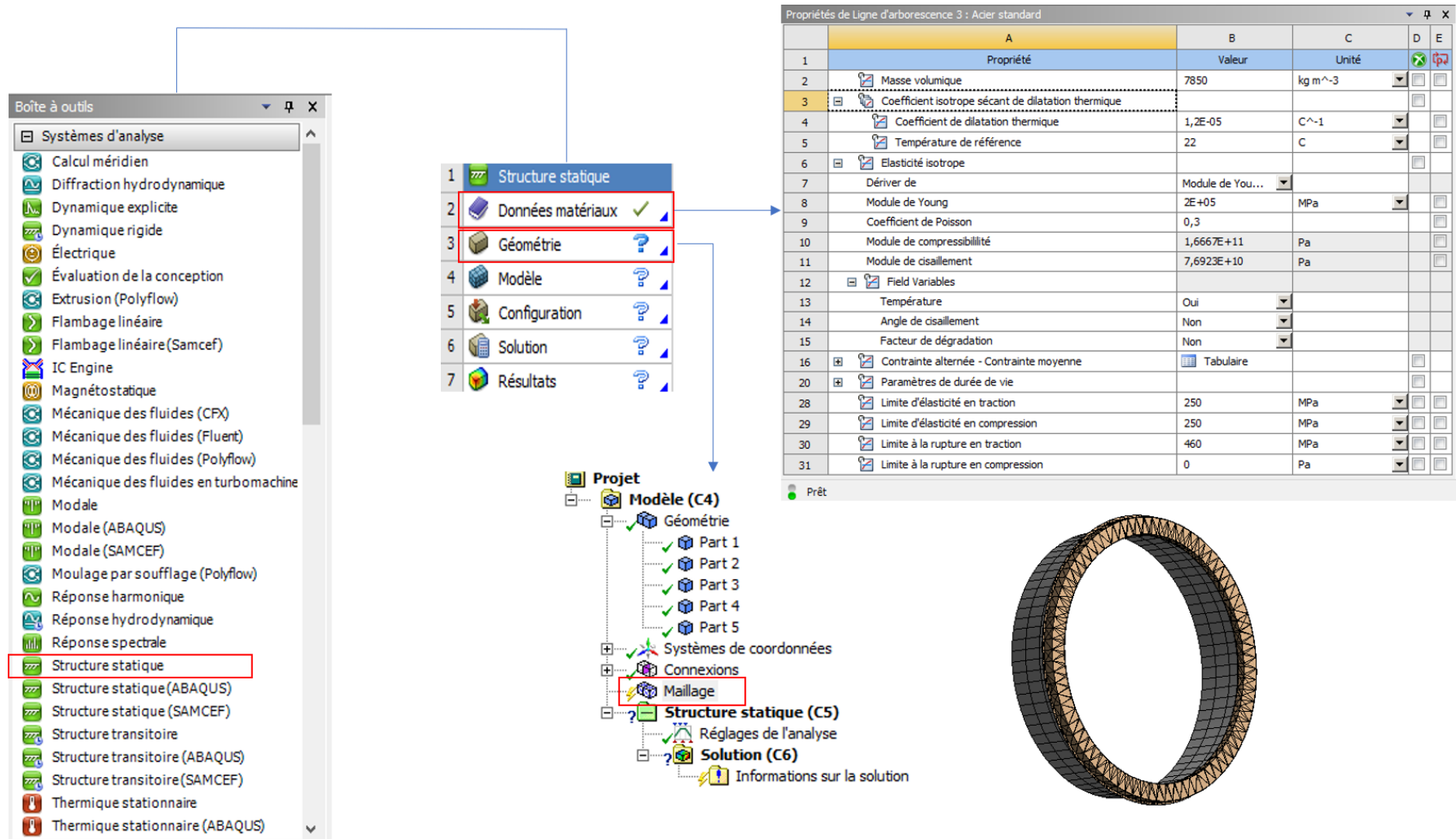


Figure 3.3: 1 ère étape de l'analyse statique

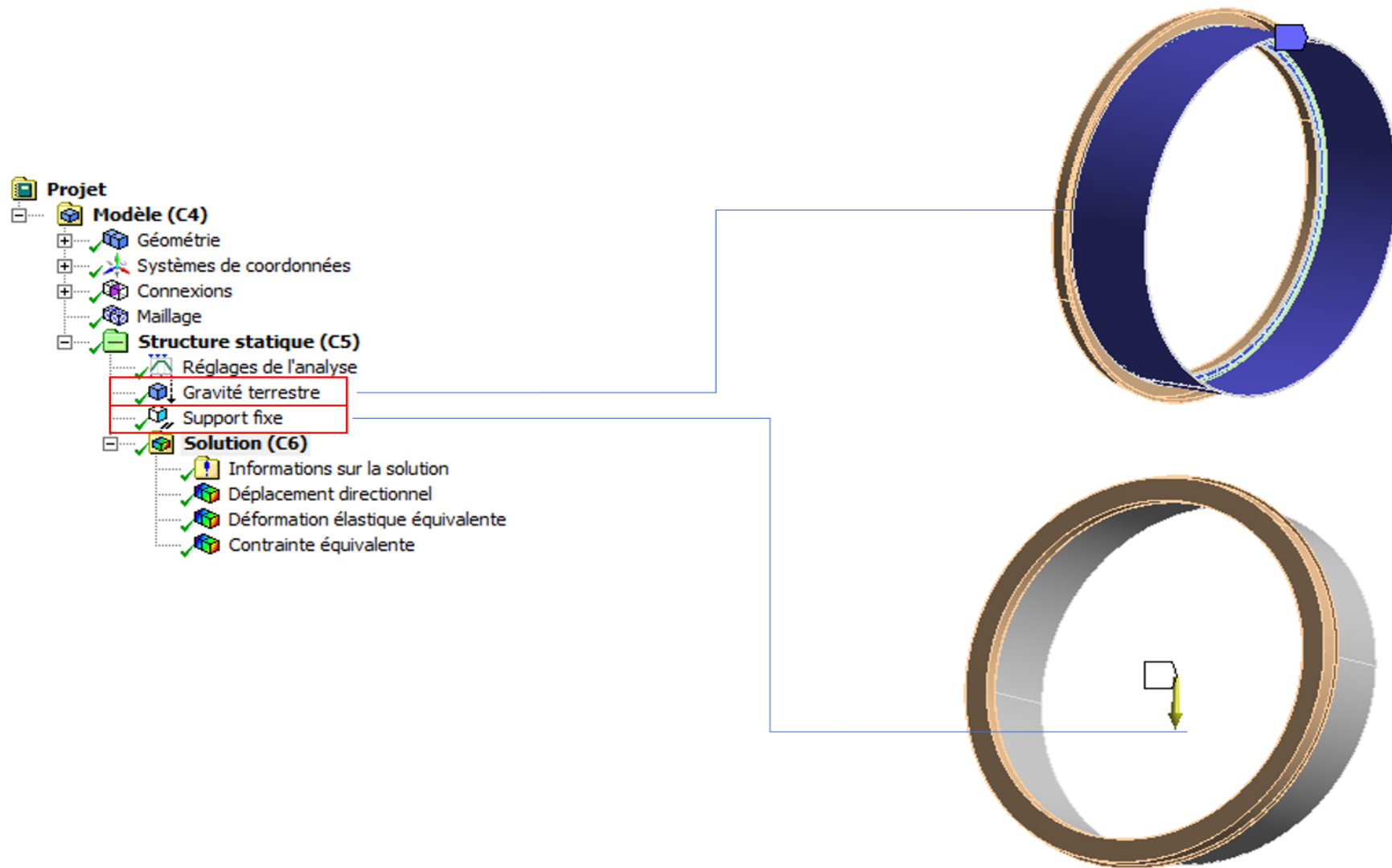


Figure 3.4: 2ème étape de l'analyse statique

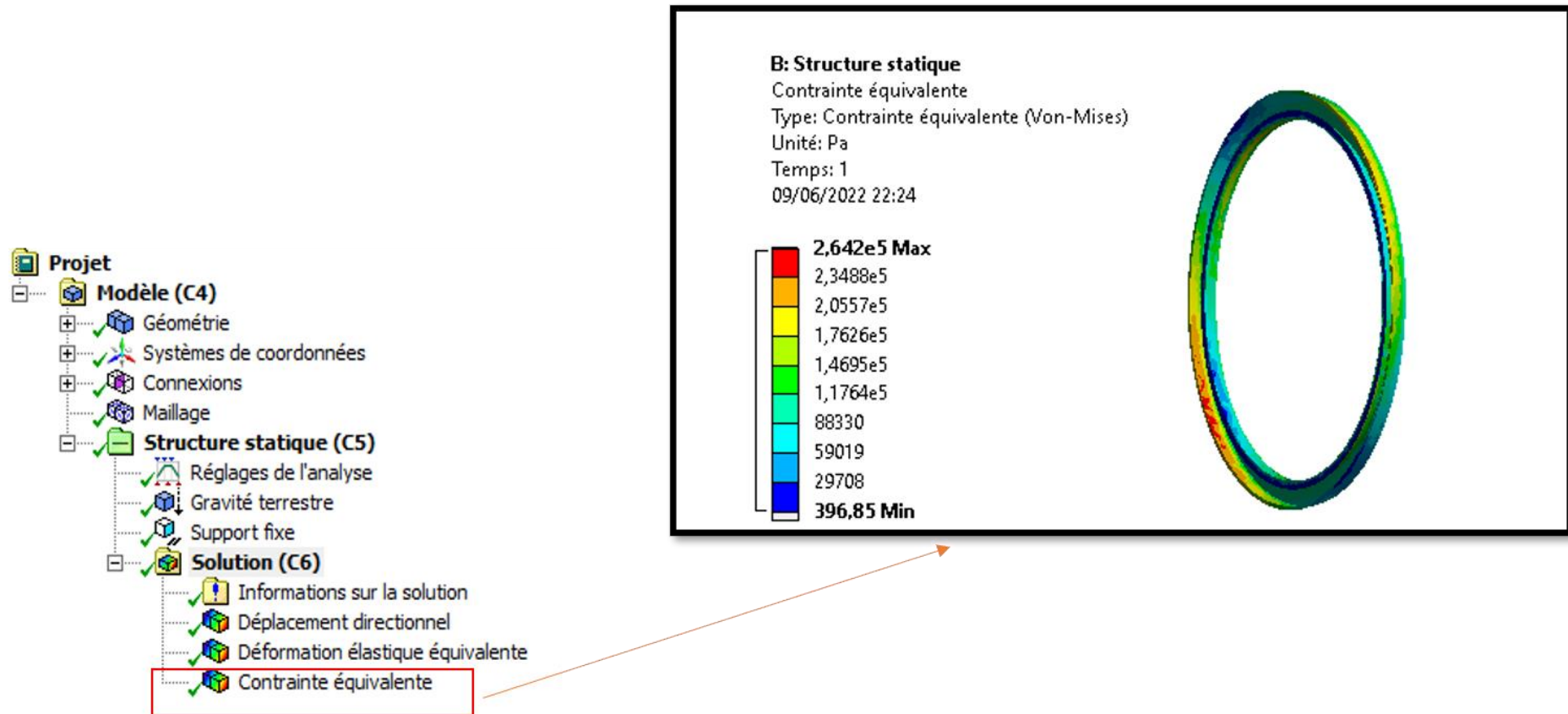


Figure 3.5: Répartition de la contrainte équivalente de Von-Mises sur le carter

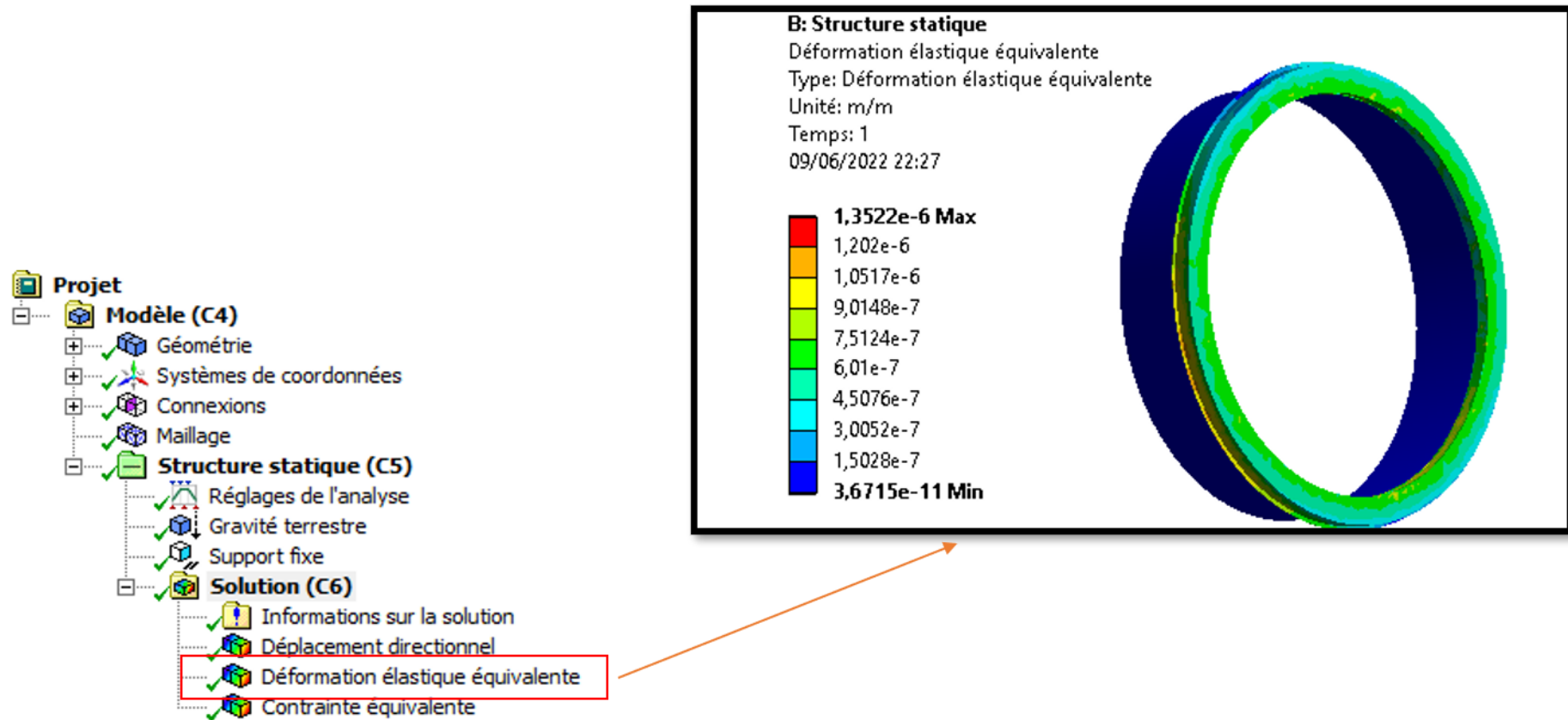


Figure 3.6: Répartition de la déformation élastique équivalente sur le carter

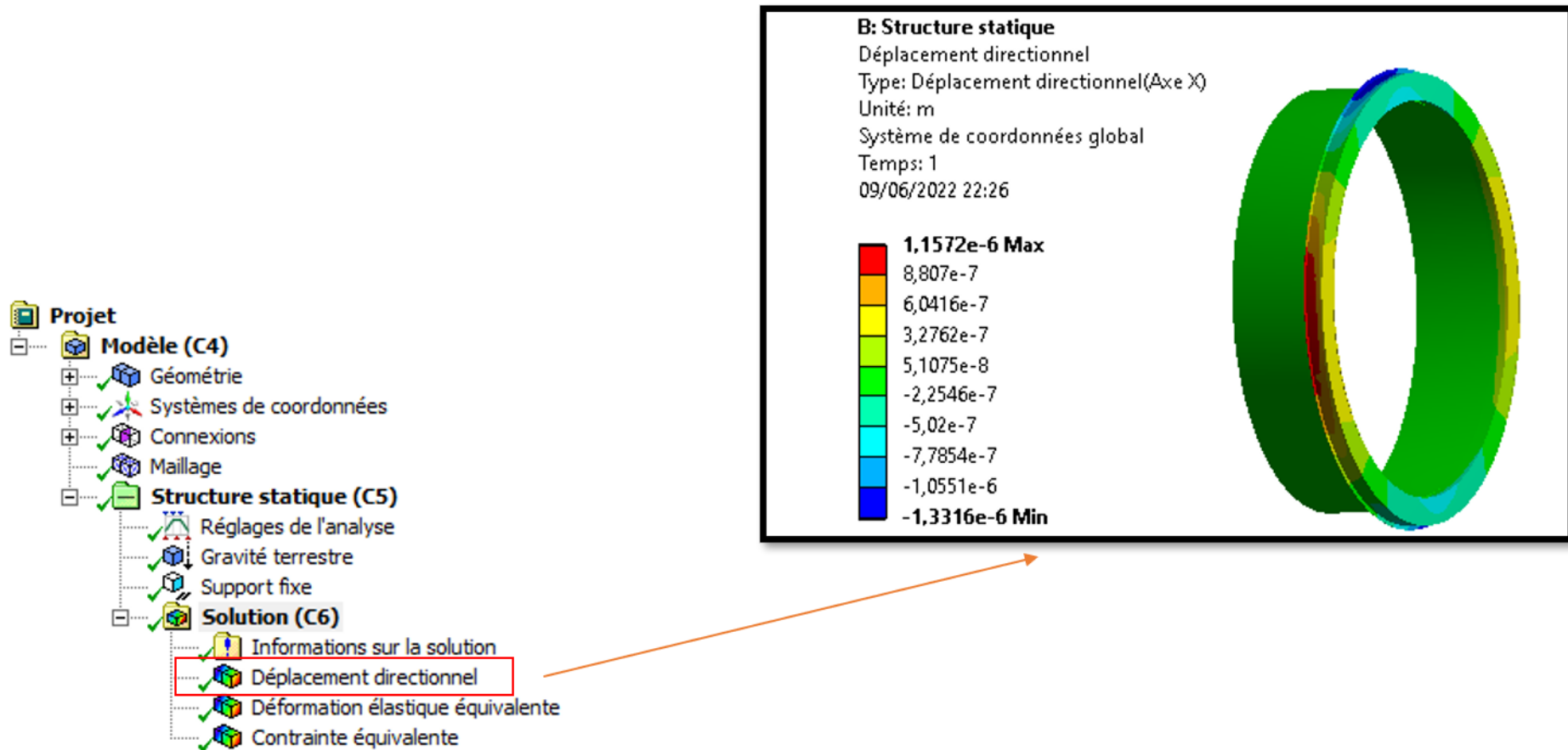


Figure 3.7: Répartition du déplacement directionnel sur le carter

✚ Interprétation des résultats :

ANSYS représente le champ de contrainte équivalente dans un graphique coloré, avec une contrainte nulle en bleu et une contrainte équivalente maximale en rouge. Il est ainsi possible de détecter les points critiques des pièces.

- ❖ En ce qui concerne la contrainte équivalente de Von-Mises, ANSYS donne que la valeur de la contrainte équivalente maximale est égale à $2.642 * 10^5$ Pascal comme il apparaît dans « la figure 3.5 », donc en la comparant avec la limite d'élasticité de l'acier on constate qu'elle est inférieure à celle-ci, ce qui applique que le carter est résistant et ne sera pas déformé lors du fonctionnement du broyeur à boulets.
- ❖ En ce qui concerne la déformation élastique équivalente, ANSYS donne que la valeur de déformation équivalente maximale est égale à $1.35 * 10^{-6}$ Pascal comme il apparaît dans « la figure 3.6 », donc il n'existe pas un risque de déformation car elle est très petite.
- ❖ La même chose pour le déplacement directionnel, « la figure 3.7 » montre le déplacement suivant l'axe x en fonction du temps, sa valeur maximale est $1.15\mu m$, donc il n'y aura pas un déplacement important du carter.

3.2 Solutions possibles au niveau du centrale hydraulique :

Il existe actuellement plusieurs solutions pour minimiser la contamination d'huile en poussière au niveau de la centrale hydraulique et améliorer la lubrification du réducteur COMBIFLEX :

3.2.1 Redimensionnement de l'unité de stockage d'huile :

Suite à l'analyse de cette unité, Le volume théorique de réservoir doit être supérieur au réservoir actuel, il doit être supérieur à

$$8 * Q_{totale} \approx 3040L$$

Avec Q_{totale} c'est le débit total.

Alors il faut augmenter le volume du réservoir coté recirculation d'un volume de 1040 L (figure 3.8).

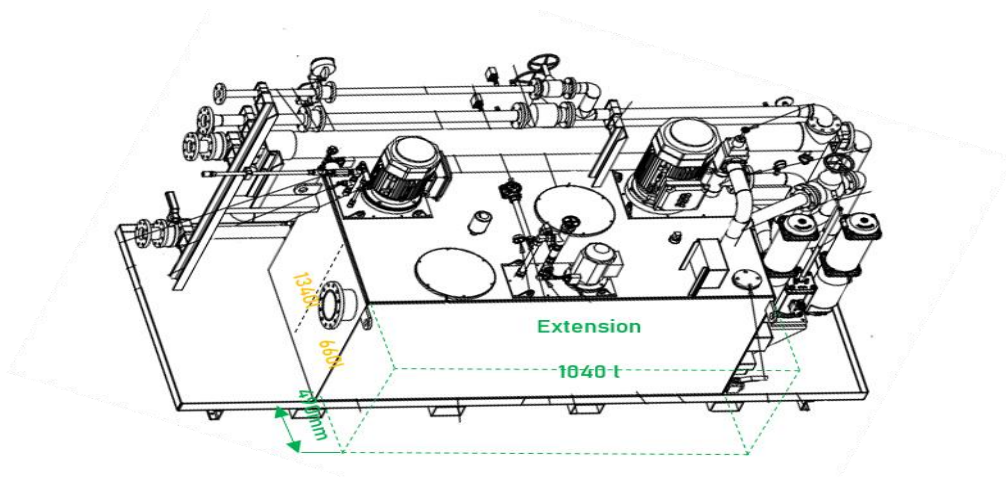


Figure 3.8: Schéma d'extension du réservoir

Cette solution est applicable dans la réalité grâce à l'espace vide qui existe dans la centrale de lubrification comme il apparaît clairement dans « la figure 3.9 ».



Figure 3.9: Centrale de lubrification de CIMAT

3.2.2 Séparation de lubrification Réducteur – Patins :

Cette solution sert à faire une séparation entre le circuit de lubrification du réducteur et des patins comme le montre « la figure 3.10 ». Donc la poussière entrant par le joint d'étanchéité du carter va rester dans le circuit de lubrification des patins.

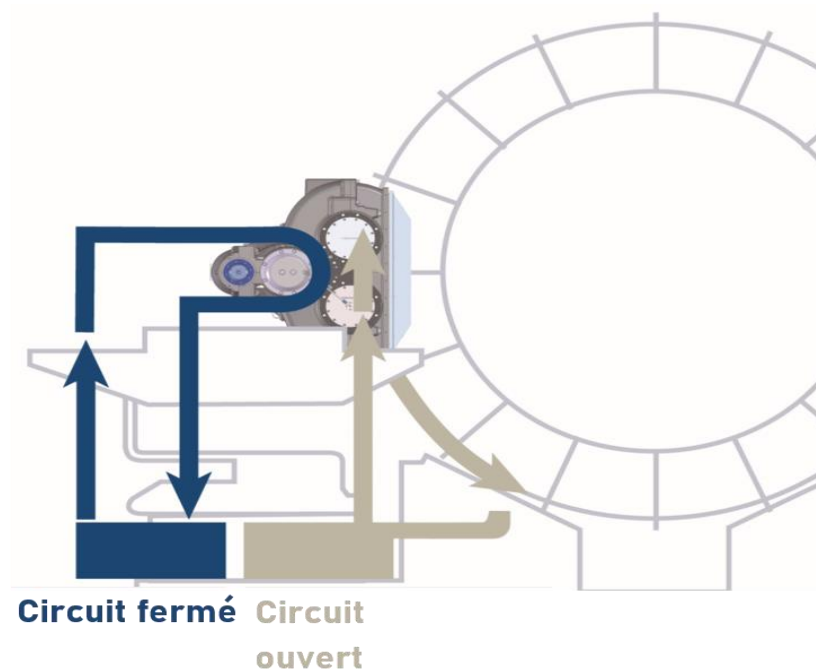


Figure 3.10: Schéma proposée de la séparation des circuits de lubrification

Cette solution va se baser sur les points suivants :

- À l'intérieur du réducteur, les circuits d'huile sont séparés.
- Les roulements sont alimentés en huile propre du circuit fermé
- Le pignon d'attaque est alimenté de circuit ouvert
- La séparation est réalisée par des tôles

3.2.3 Amélioration de la filtration

L'installation d'une unité de filtration externe (mobile) comme il est illustré dans « la figure 3.11 » va permettre un fonctionnement plus long que dans l'état normal sans colmatage de filtre double, cette amélioration de filtration est considérée comme une solution palliative.

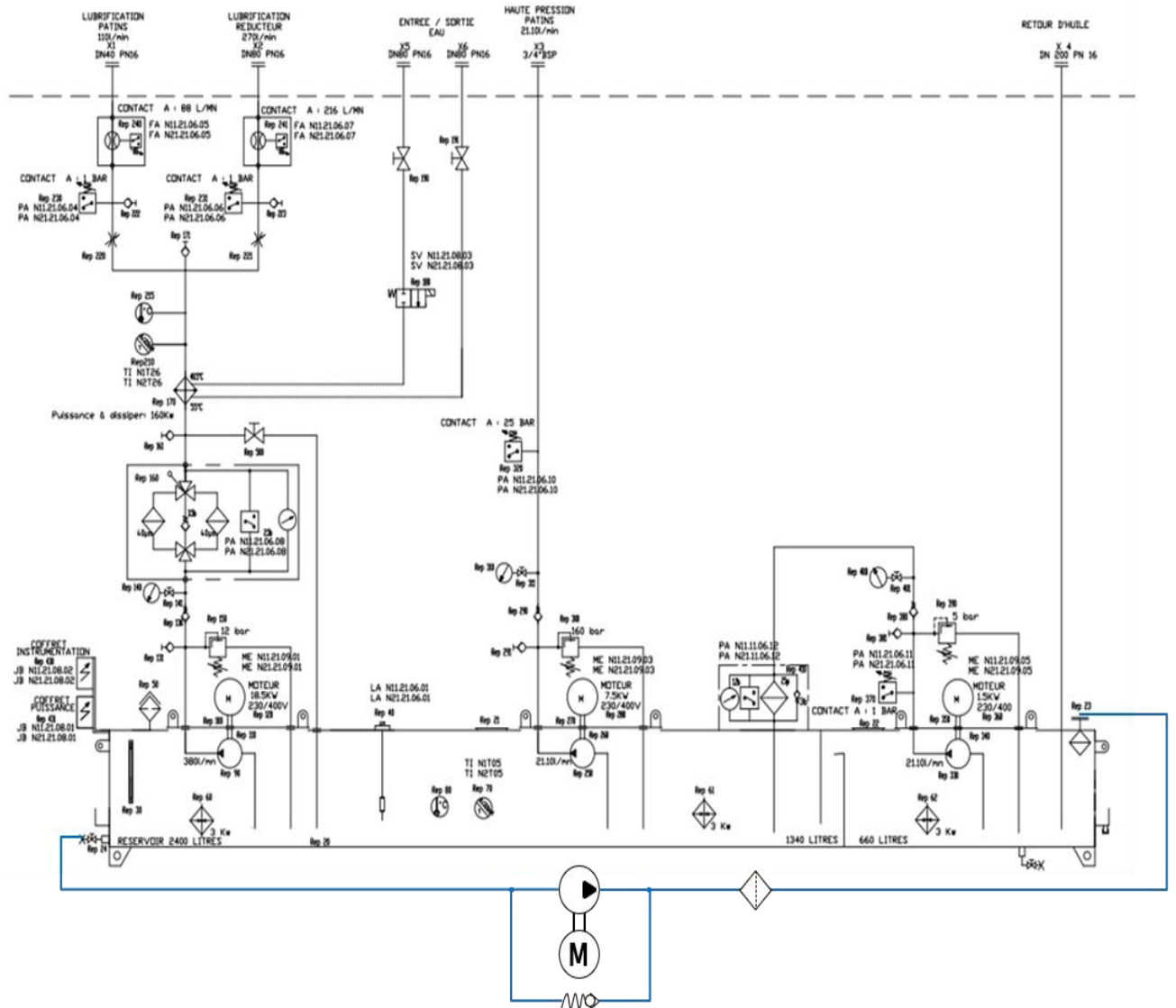


Figure 3.11: Schéma proposée pour l'amélioration de la filtration

Une autre solution possible pour améliorer la filtration c'est le redimensionnement de la filtration de chaque partie de la centrale de lubrification (figure 3.12) :

- ❖ Le circuit basse pression par :
 - 1) Amélioration de taux de filtration (filtre double de 25µm au lieu d'un filtre double de 40 µm).
- ❖ Le circuit de retour par :
 - 2) Ajout d'un filtre de 240µm.
- ❖ Le circuit de recirculation par :
 - 3) L'ajout d'un filtre double de 10µm au lieu d'un seul filtre de 25 µm
 - 4) Changement du groupe Moto-Pompe par un nouveau de débit de (100L/min).

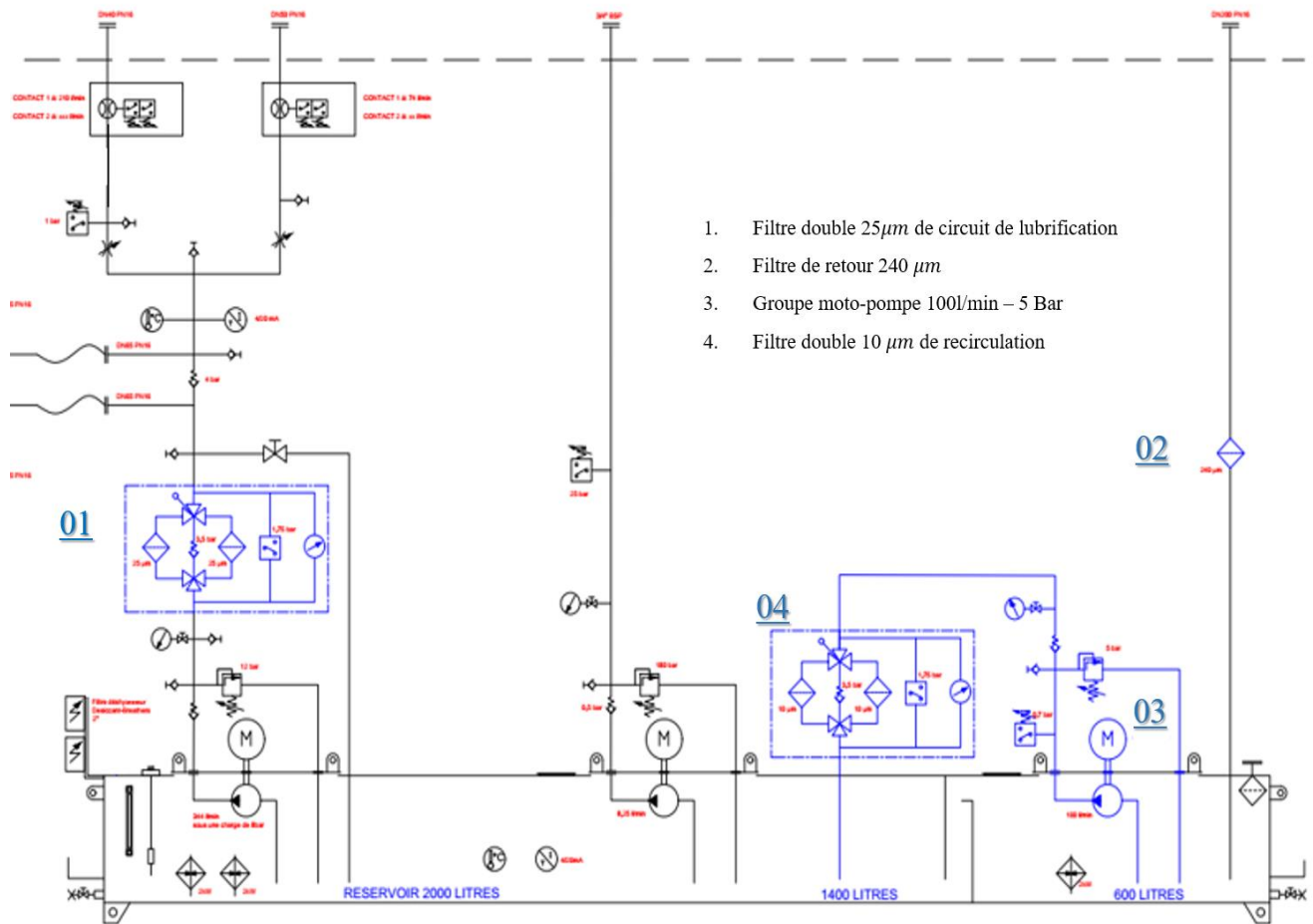


Figure 3.12: Schéma du redimensionnement de la filtration

Conclusion Générale

Notre projet a pour objectif principal l'optimisation des performances du broyeur ciment, cet équipement qui joue un rôle très important dans la chaîne de la production du ciment et sa disponibilité est une nécessité pour l'entreprise, c'est pour cela CIMAT utilise deux broyeurs ciments en parallèle pour que la production ne s'arrête jamais.

On a commencé par l'analyse fonctionnelle afin d'étudier le besoin et élaborer le cahier des charges, après on a effectué une analyse AMDEC pour déterminer les typologies de défaillances, leurs causes et leur criticité s'ensuivront par une analyse des problèmes critiques retenus et une proposition d'un plan d'action.

A l'étape d'optimisation, nos recherches ont abouti aux propositions suivantes :

- L'introduction d'un carter au niveau de l'extrémité de la virole pour empêcher la pénétration d'impureté ainsi de garder la propreté d'huile dans le but d'éviter la détérioration des roulements et par conséquent éviter l'arrêt du réducteur qui commande le broyeur ciment (élément coûteux).
- Optimiser le fonctionnement de la centrale hydraulique, premièrement en redimensionnant l'unité de stockage d'huile afin de régler le problème du débit insuffisant. Deuxièmement en modifiant dans la conception du réducteur en séparant la lubrification Réducteur – Patins pour éviter la contamination d'huile en poussière et troisièmement en améliorant la filtration dans le circuit hydraulique soit en ajoutant une unité de filtration externe (mobile) soit en augmentant le niveau de filtration en changeant les types des filtres du circuit.

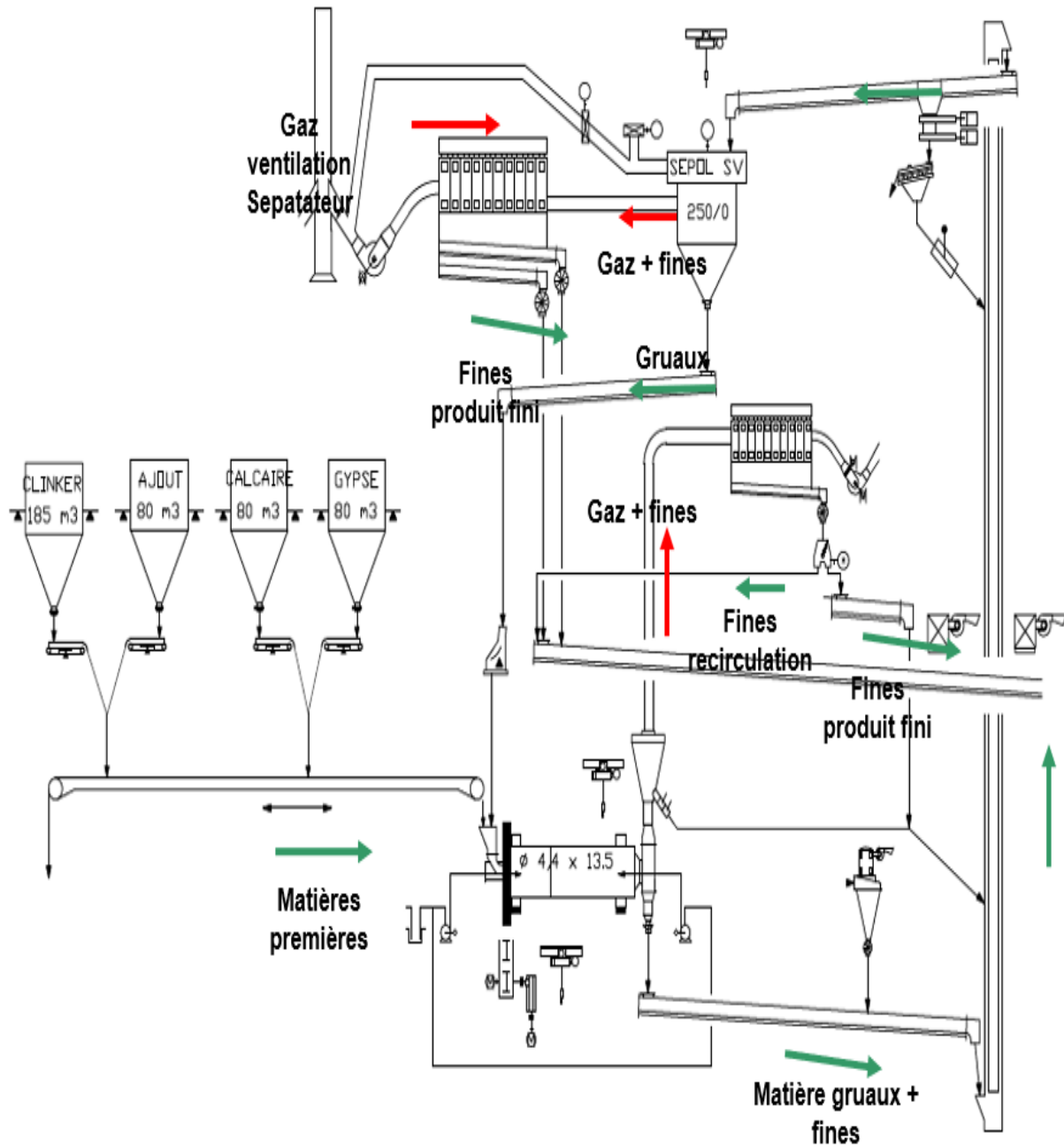
Références

- [1] : **Info Ciments**, Fabrication du ciment Portland : Le process,
<https://www.infociments.fr/ciments/fabrication-du-ciment-le-process>
- [2] : **France-scientifique**. Broyeur à couteaux.<https://france-scientifique.fr/produits/preparation-echantillons/broyeur/broyeur-a-couteaux/>.
- [3] : **Jouve Nicolas**, Cours de fragmentation des solides : introduction,
http://www.azprocede.fr/Cours_GC/fragmentation_introduction.html.
- [4] : **Solutions, Mill Powder Tech**. Broyeur à broches. *Mill Powder Tech*.
<https://www.mill.com.tw/fr/product/19.html>.
- [5] : Bin El Ouidane Hassan, Cours d'analyse Fonctionnelle, FST-FES
- [6] : Ramadany Mohamed, cours de Gestion de la maintenance, Analyse AMDEC, FST-FES

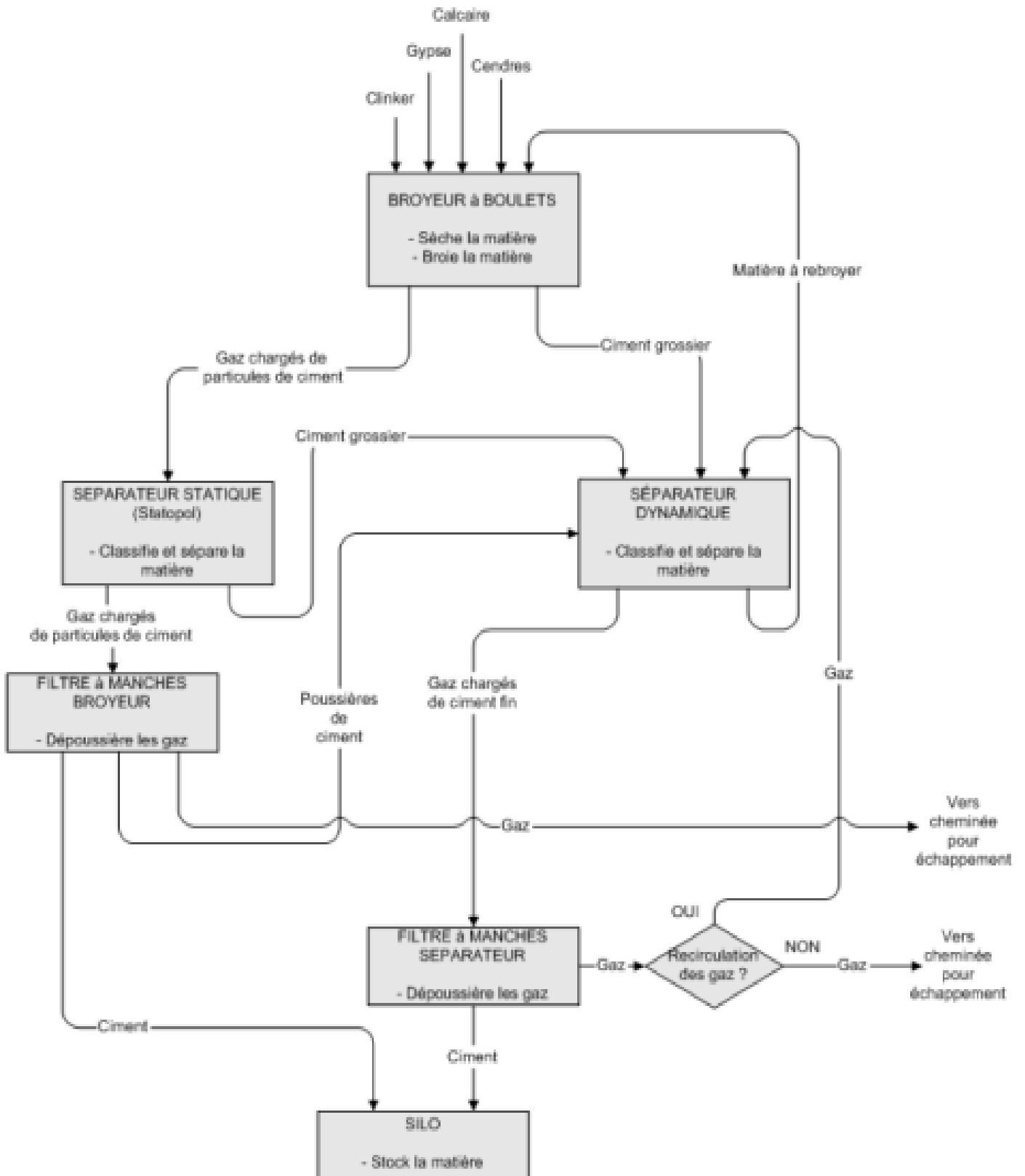
ANNEXE

Annexe A : Spécifications techniques de l'atelier du broyage ciment BK1 et BK2.

1) Flow Sheet de l'atelier du broyage ciment :

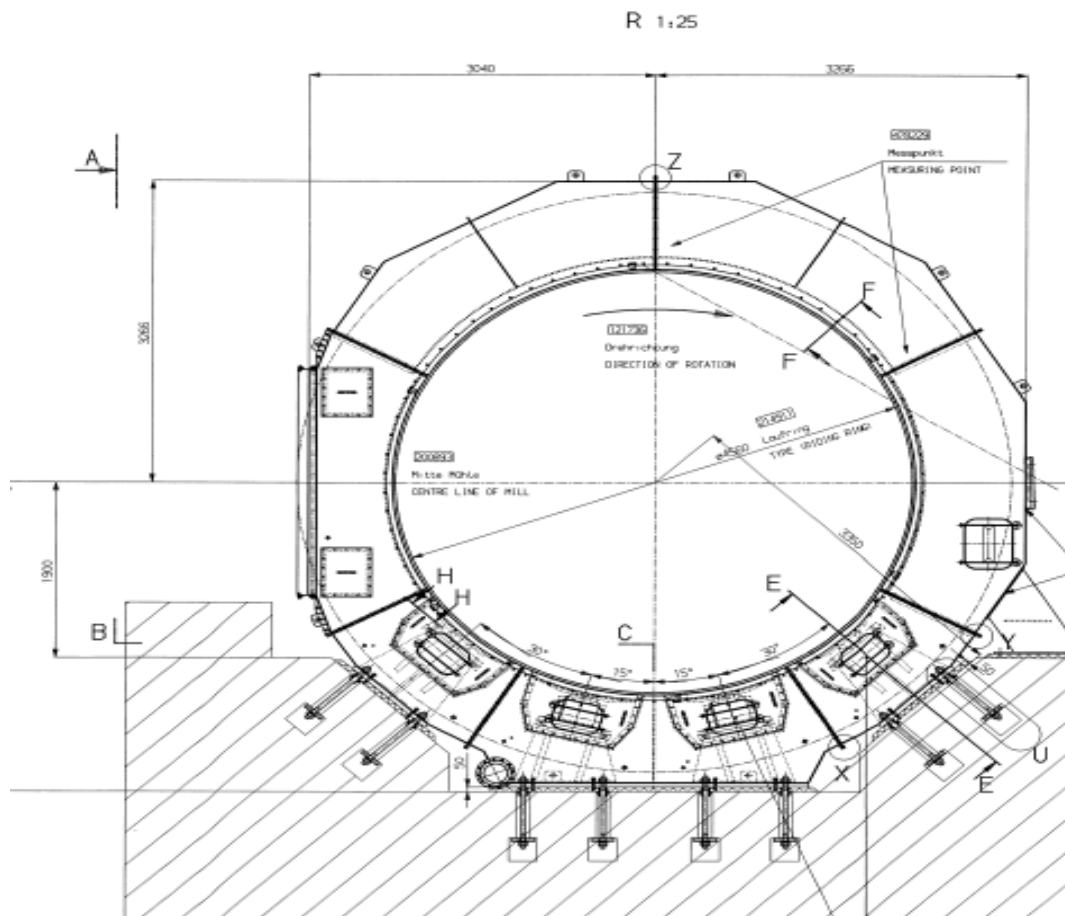


2) Principe de fonctionnement de l'atelier du broyage ciment :

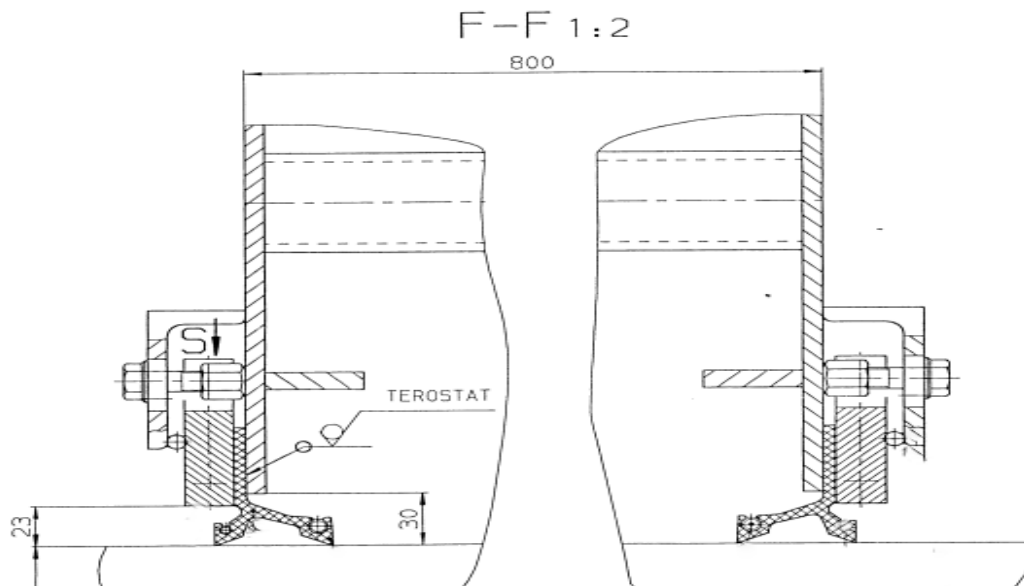


Annexe B : dessin d'ensemble du palier fixe du constructeur KRUPP POLYSIUS

1) Dessin d'ensemble du palier fixe du constructeur KRUPP POLYSIUS



2) Coupe F-F du palier fixe :



3) Dessin du carter antipoussière, la solution proposée pour régler le problème de contamination :

