



## RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ETUDES

*Pour l'Obtention du*

**Diplôme de Master Sciences et Techniques  
Spécialité : Génie Mécanique et Productique**

**Thème :**

***Résolution du problème d'usure au niveau  
des Broyeurs ciment BK4 et cru***

*Présenté par :*

**QANDIL Hamza & LAZRAK Ibrahim**

*Encadré par :*

- SEDDOUKI Abbass, Professeur département Génie Mécanique, FST Fès
- BENCHEKROUN Mohammed, Encadrant de la société LafargeHolcim Fès

*Effectué à : LafargeHolcim Fès*

*Soutenu le : 16/06/2017.*

**Devant le jury :**

- Pr. A. Seddouki                      Faculté des Sciences et Techniques de Fès
- Pr. A. EL Hakimi                      Faculté des Sciences et Techniques de Fès
- Pr. A. EL Khalfi                      Faculté des Sciences et Techniques de Fès

**Année Universitaire : 2016-2017**

## Remerciement

*S'il est vrai qu'un rapport de stage est le fruit d'un travail personnel, beaucoup de personnes ont cependant contribué à son élaboration.*

*Nous tiendrons tout d'abord à remercier vivement notre encadrant de la FST, Mr A. SEDDOUKI, pour son orientation tout au long de notre stage.*

*Encore une fois merci pour vos conseils attentionnés, vos réponses précises et pour avoir su nous transmettre les bons conseils et les bonnes recommandations au moment où il le fallait pour pouvoir atteindre les objectifs souhaités.*

*Nous tiendrons aussi à exprimer notre gratitude les plus profondes à notre encadrant de la société LafargeHolcim Mr. Mohammed Bencheikroun, responsable de la maintenance pour son encadrement durant toute la période de stage.*

*Par la même occasion, nous remercions aussi à Mr Marrakchi Abderrafie, Mr ERREBI Omar, Mr Raya, Mr Menkal, Mr. Azri et Mr Noureddine Bourazzak, et l'ensemble du personnel de LafargeHolcim, cadres, employés et ouvriers qui nous ont comblés de leurs bienveillances et amabilité.*

*Nos vifs remerciements vont également à messieurs les Professeurs du département « Génie Mécanique » qui ont participé à notre formation au sein de la FST, et qui ont fait tous leurs efforts pour nous assurer une bonne intégration au domaine mécanique, aussi à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.*

## **Dédicace**

**Nous dédions ce travail à nos chers parents qui ont été toujours prêts pour nous soutenir, nous présenter tant de tendresse, et de sacrifices, et qui ont pu créer le climat idéal à la poursuite de nos études. Nous espérons qu'ils seront fiers de nous et qu'ils trouveront ici tout notre respect, notre gratitude et notre profond sentiment.**

**Nous prions Dieu de les bénir, de veiller sur eux et nous espérons qu'ils seront toujours fiers de nous.**

**Et que toutes nos familles trouvent ici l'expression de nos sentiments, de respect et de reconnaissance pour l'encouragement et le soutien que n'ont jamais cessé de nous apporter.**

**Nous profitons également de cette occasion pour exprimer notre fidélité et amitié infinie à tous nos amis qui ont été toujours à nos côtés pour éclaircir nos cheminements.**

## Liste des abréviations

Ltd : Limited ou Limité.

AFR : Alternative Fuel and Raw matériel ou Combustible Alternatif et Matières premières.

CIMA : Cimenterie Maghrébine.

ODI : L'Office pour le Développement Industriel.

SNMC : Société Nationale des Matériaux de Construction.

CIOR : Cimenterie de l'Oriental.

BPE : Béton Prêt à l'Emploi.

MTBF : Mean Time Between Failures ou Temps Moyen Entre Pannes.

NF : Norme Française.

CPJ : Ciment Portland composé avec Ajouts.

CPA : Ciment Portland Artificiel.

MAD : Dirhams marocaine.

## Liste des tableaux

Tableau 1: Historique de la société Holcim Maroc.....	12
Tableau 2 : cadre juridique de LafargeHolcim MAROC.....	13
Tableau 3: Méthode present state/desired state.....	24
Tableau 4: recherche intuitive.....	36
Tableau 5:les propriétés des matériaux.....	46

## Liste des figures

Figure 1:Cimenterie de Fès Ras El Ma .....	13
Figure 2: Organigramme de l'usine LafargeHolcim -Fès Ras El Ma.....	14
Figure 3:Les composants du ciment.....	16
Figure 4:Processus de fabrication du ciment.....	17
Figure 5 : Broyeur vertical à galets Loesche.....	18
Figure 6:Atelier de broyage du ciment.....	19
Figure 7: les galets du broyeur LOESCHE .....	20
Figure 8:Le séparateur .....	21
Figure 9: Abrasion à deux corps .....	25
Figure 10:Abrasion à trois corps fermée : (a) $D < D_{max}$ grain et (b) $D > D_{max}$ grain .....	26
Figure 11: Abrasion à trois corps ouvert.....	27
Figure 12: usure du roulement par adhésion .....	28
Figure 13: mécanisme d'usure par corrosion.....	29
Figure 14:les appareils de mesure d'usure.....	29
Figure 15: système actuel de mesure d'usure utilisé pour les galets et la piste .....	34
Figure 16:Graphe des interactions ou diagramme Pieuvre.....	37
Figure 17: Arbre fonctionnel.....	39
Figure 18:prototypage numérique sur PTC Creo .....	43
Figure 19 : fixation du système sur le bandage galet et la piste .....	43
Figure 20:Fixations réel du système de mesure d'usure .....	44
Figure 21:système de mesure d'usure.....	44
Figure 22:nuages des matériaux pour $I = \sqrt{E/C\rho}$ .....	45
Figure 23 : nuages des matériaux pour $I = \sqrt{E/\rho}$ .....	46
Figure 24:Vue isométrique du système sur Ansys .....	47
Figure 25:application des conditions aux limites .....	48
Figure 26 : VISUALISATION des résultats .....	48
Figure 27:Cadenas de consignation du Broyeur.....	49
Figure 28:Fixation de système de mesure d'usure pour la piste .....	50
Figure 29:montage de la glissière et l'appareil de mesure.....	50
Figure 30 : planification de changement de piste sur SAP.....	52
Figure 31 : prise des nouvelles mesures.....	54
Figure 32:le relevé des mesures pour le galet .....	54
Figure 33: bandage de galet avant(a) et après(b) rechargement.....	55
Figure 34:rechargement de galet du broyeur BK4 .....	58
Figure 35: rechargement de piste du broyeur BK4 .....	58
Figure 36 : Données géométriques du galet.....	60
Figure 37 : Données géométriques de la piste.....	60
Figure 38 : Choix de matériau par CES .....	61
Figure 39 : Les propriétés du matériau.....	62
Figure 40 : Les résultats numériques pour le Galet.....	63
Figure 41 : Résultats numériques pour la piste .....	64
Figure 42 : Le choix de matériau par CES (stage 1) .....	66
Figure 43 : Choix de matériau par CES (stage 2).....	67
Figure 44 : Choix de matériau par CES (stage 3).....	68
Figure 45 : Les propriétés des matériaux .....	69
Figure 46 : nouvelle résultat.....	70
Figure 47 : Les nouveaux concepts proposés.....	71
Figure 49 : les deux morceaux proposés en céramique .....	72
Figure 50 : Visualisation des résultats pour le nouveau concept.....	74

## Sommaire

Remerciement .....	2
Dédicace.....	3
Liste des abréviations.....	4
Liste des tableaux.....	4
Liste des figures .....	5
Introduction.....	9
Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil .....	10
1. Présentation de la société Holcim.....	11
1.1 Présentation générale .....	11
1.2 Présentation de Holcim Maroc.....	11
1.3 L'Histoire de la société Holcim Maroc.....	11
1.4 La fusion de Lafarge et Holcim : .....	12
1.5 Cadre juridique.....	13
1.6 LafargeHolcim Fès.....	13
1.7 L'organigramme de LafargeHolcim Fès.....	14
Chapitre 2 : Description du Processus de fabrication du ciment & Présentation du Circuit du Broyage .....	15
I. Description du Processus de fabrication du ciment .....	16
1. Le ciment.....	16
2. Les matières premières du ciment .....	16
3. Le processus de fabrication du ciment .....	16
II. Présentation du Circuit du Broyage .....	17
1. Généralité .....	17
2. Circuit de broyage .....	18
3. Les principaux éléments du broyeur .....	19
3.1. Les galets de Broyeur LOESCHE .....	20
3.2. La piste (la table) du broyeur.....	20
3.3. Le séparateur.....	21
Chapitre 3:Présentation de sujet de stage.....	22
1. Définition de la problématique .....	23

2.	La précision du flou.....	23
A.	Trouver d'où vient le problème .....	23
B.	Présent State / Desired State (état présent/ état désiré) .....	23
3.	La recherche des données:.....	24
3.1	Méthode 3QOCP.....	24
3.2	La recherche documentaire .....	25
A.	Définition d'usure.....	25
B.	Les types d'usures mécaniques.....	25
1.	Usure abrasive: définition.....	25
2.	Usure par adhésion : définition.....	27
3.	Usure par fatigue .....	28
4.	Usure par corrosion .....	28
3.3.	Les appareils de mesure d'usure .....	29
4.	Enoncé du problème.....	30
4.1.	La divergence.....	30
5.	La recherche des idées.....	31
5.1.	La divergence.....	31
6.	Mise en application .....	31
6.1.	La divergence.....	31
6.2	La convergence .....	32
Chapitre 4 : Etude et conception d'un appareil de mesure d'usure.....		34
1.	Généralité sur le Gabarit : .....	34
2.	Problématique : .....	34
3.	Analyse fonctionnelle.....	35
3.1.	Recherche des fonctions .....	35
3.2.	Ordonner les fonctions.....	37
3.3.	Caractérisation des fonctions .....	40
4.	Etude conceptuelle .....	42
4.1	La matrice morphologique .....	42
4.2	Prototypage .....	43
5	. Dimensionnement du concept de mesure.....	44
5.1.	Mise en situation .....	44
5.2.	Choix du matériau convenable.....	45

5.3. Choix basés sur le logiciel de CES .....	45
5.4. Démarche de l'analyse d'une structure : .....	47
5.5. Choix des aimants de fixation : .....	49
6 La Méthodes d'utilisation de système de mesure d'usure .....	49
Chapitre 5 : Solutions proposées pour le problème d'usure .....	51
I. Introduction.....	52
II. Solution court terme (changement de la piste).....	52
III. Solution moyen terme (suivi d'usure).....	53
1. Mise en situation .....	53
2. Méthodes de mesures d'usure pour les galets et la piste.....	53
3. La méthode de calcul de volume usé.....	55
4. Rechargement des galets et de Piste pour le Broyeur ciment BK4.....	57
IV. Solution long terme (nouvelle conception) .....	59
1. Présentation du principe de broyage LOESCHE .....	59
2. Étude statique des deux systèmes piste et bandage galets .....	60
2.1. Les Donnés du problème .....	60
2.2. Les hypothèses et les résultats anticipés .....	62
3. Choix du matériau.....	65
3.1. Analyse des nouveaux matériaux .....	69
4. Génération des concepts.....	71
5. Étude de faisabilité.....	72
5.1. Faisabilité technique. ....	72
5.2. Rentabilité économique. ....	73
5.3. Simulation du nouveau concept galet .....	73
Chapitre 6 : Etude économique.....	76
1. Les Coûts des maintenances effectuées en cas d'usure des bandages galets et de la piste 76	
1.1. Les coûts directs ou coût de maintenance.....	77
1.2. Les couts indirects ou bien couts d'indisponibilités.....	77
Conclusion générale.....	79
Annexe : .....	80
Références : .....	82

## Introduction

Ce rapport est le fruit d'un travail collectif durant la période de notre stage, dans l'entreprise LafargeHolcim de Fès, où nous avons pu constater que rien n'est laissé au hasard. La qualité de ses produits, l'amélioration de sa production et la satisfaction de sa clientèle si abondante, étaient la préoccupation aussi bien de ses dirigeants que celle de ses ouvriers.

C'est dans ce contexte et dans le cadre de notre projet d'étude que LafargeHolcim nous a accordée l'opportunité de contribuer à la résolution de problème d'usure des broyeurs ciment BK4 et cru qui joue un rôle très important dans la fabrication du ciment.

Le but de ce projet effectué à LafargeHolcim Ras El Ma au sein du service maintenance mécanique, est de faire une réalisation d'un concept qui permet de mesurer l'usure au niveau des Broyeurs ciment et cru , d'établir un fichier Excel de suivi d'usure qui permet d'afficher le volume usé et le tonnage de la matière enlevée à partir des mesures enregistrer en cas de rechargement et après rechargement , et finalement de trouver une résolution de problème

Le présent rapport sera organisé selon le plan suivant :

- Le premier chapitre consiste à présenter l'organisme d'accueil.
- Le second sera réservé à quelques généralités concernant le ciment, la description de son processus de fabrication ainsi qu'une présentation pour le circuit de Broyage.
- Dans le troisième chapitre, nous présenterons la problématique du projet.
- Le quatrième chapitre sera consacré pour l'étude et conception d'un appareil de mesure d'usure.
- Le cinquième chapitre réservé pour les solutions proposées pour le problème d'usure.
- Etude économique.

## Chapitre 1 :

# Présentation de l'organisme d'accueil

# Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil

## 1. Présentation de la société Holcim

### 1.1 Présentation générale

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

Le groupe HOLCIM Ltd est un groupe suisse fondé en 1912, c'est un acteur majeur au niveau mondial dans la production de ciment, granulats et bétons. Le groupe est aujourd'hui présent sur les 5 continents dans près de 70 pays et emploie près de 80.000 personnes.

Les trois activités principales du groupe sont :

- La production de ciment.
- La production de granulats.
- Le développement de produits et services à haute valeur ajoutée pour le secteur de la construction et des travaux publics, tels que le béton prêt à l'emploi.

Holcim compte parmi les leaders de la production de matériaux de construction car il se concentre sur ses produits de base, en particulier la production et la distribution de ciments et granulats.

### 1.2 Présentation de Holcim Maroc

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

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

### 1.3 L'Historique de la société Holcim Maroc

Les événements clés ayant marqué l'histoire de HOLCIM depuis sa création sont les suivants :

**Tableau 1: Historique de la société Holcim Maroc**

1972	Les gouvernements marocain et algérien décident de construire une cimenterie à Oujda, sous le nom de la Cimenterie Maghrébine (CIMA). Son capital social est de 75 millions de dirhams, réparti à égalité entre l'Office pour le Développement Industriel (ODI) et la SNMC, organismes représentant respectivement le Maroc et l'Algérie. Le projet CIMA fut mis en veilleuse et placé sous administration provisoire à cause du retrait algérien de l'opération en 1975.
1980	Installation à Fès d'un centre d'ensilage d'une capacité de 500 000 tonnes par an.
1985	Création de Ciments Blanc du Maroc à Casablanca.
1989	Installation d'un centre de broyage à Fès d'une capacité de 350 000 tonnes par an.
1990	Début des travaux pour la réalisation d'une ligne complète de production de clinker à Fès et lancement de l'activité BPE avec l'installation d'une première centrale à béton à Fès.
1993	Démarrage de l'unité de Fès portant la capacité de production globale à 1,9 million de tonnes par an. Prise de contrôle majoritaire du capital de la CIOR par Holcim Ltd dans le cadre du programme de privatisation.
1997	Installation d'une centrale à béton à Rabat et d'une autre à Casablanca.
2001	Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 de la cimenterie de Fès.
2004	Extension de la cimenterie de Fès.
2005	Démarrage du centre d'ensilage et de distribution de Settat.
2006	Extension du centre de Nador.
2007	Démarrage de la cimenterie de Settat et de la plateforme de prétraitement de déchets Eco val.
2008	Lancement du projet de doublement de capacité de production de l'usine de Fès. Certification ISO 9 001 et ISO 14 001 du centre de Nador.
2010	Lancement du projet de doublement de la capacité de production clinker de la cimenterie de Fès.
2012	Doublement de la capacité de production clinker de l'usine de Fès
2014	Accord de fusion LafargeHolcim.

### **1.4 La fusion de Lafarge et Holcim :**

Le 7 Avril 2014, Holcim et Lafarge (groupe français de matériaux de construction) ont annoncé leur intention de procéder au rapprochement des deux sociétés dans le cadre d'une fusion qui par la suite est officiellement lancée le 15 juillet 2015 sous le nom de LafargeHolcim.

Suite à la fusion, le groupe LafargeHolcim deviendra un leader mondial avec une forte présence dans toutes les régions et les principaux pays du monde, au service des besoins des clients. Le groupe deviendra un partenaire privilégié dans le secteur du bâtiment et des infrastructures, à l'écoute des consommateurs tout le long de la chaîne logistique.

## 1.5 Cadre juridique

La fiche signalétique de Groupe LafargeHolcim Maroc est présentée dans le tableau suivant :

**Tableau 2 : cadre juridique de LafargeHolcim MAROC**

<b>Raison sociale</b>	<b>LafargeHolcim (MAROC)</b>
<b>Forme juridique</b>	Société anonyme de droit privé
<b>Date de création</b>	1976 pour une durée de 99 ans
<b>Activité</b>	Production et commercialisation du ciment et Matériaux de construction
<b>Capital social</b>	91.000.000 MAD
<b>Registre commercial</b>	24713
<b>N° de production fiscale</b>	512367
<b>Affiliation à la CNSS</b>	1515123
<b>Capacité de production</b>	4.500.000t/an

## 1.6 LafargeHolcim Fès

La cimenterie de Fès est située dans la localité de Ras El Ma à 25 km de l'ouest de la ville de Fès sur un terrain en propriété de la CIOR et à 340 km du port de Nador à partir duquel elle est alimentée en coke de pétrole.

L'usine est également raccordée à la voie ferrée depuis 2005.

Depuis 1996, l'usine de Fès Ras El Ma produit et commercialise différentes qualités de ciment.

L'usine de Fès, d'une capacité annuelle de broyage ciment de 1 000 000 de tonnes de ciment, utilise le procédé de fabrication à voix sèche intégrale. Le four, principal équipement de la Cimenterie, a été mis en service en 1993. La cimenterie comporte des ateliers de concassage, broyage, homogénéisation et stockage de la farine, cuisson et stockage du clinker, broyage des Combustibles, broyage du ciment et ensachage expédition du ciment.



**FIGURE 1: CIMENTERIE DE FES RAS EL MA**

## 1.7 L'organigramme de LafargeHolcim Fès

Voici une vue général de L'organigramme de la cimenterie de Fès Ras El Ma (figure 2) :

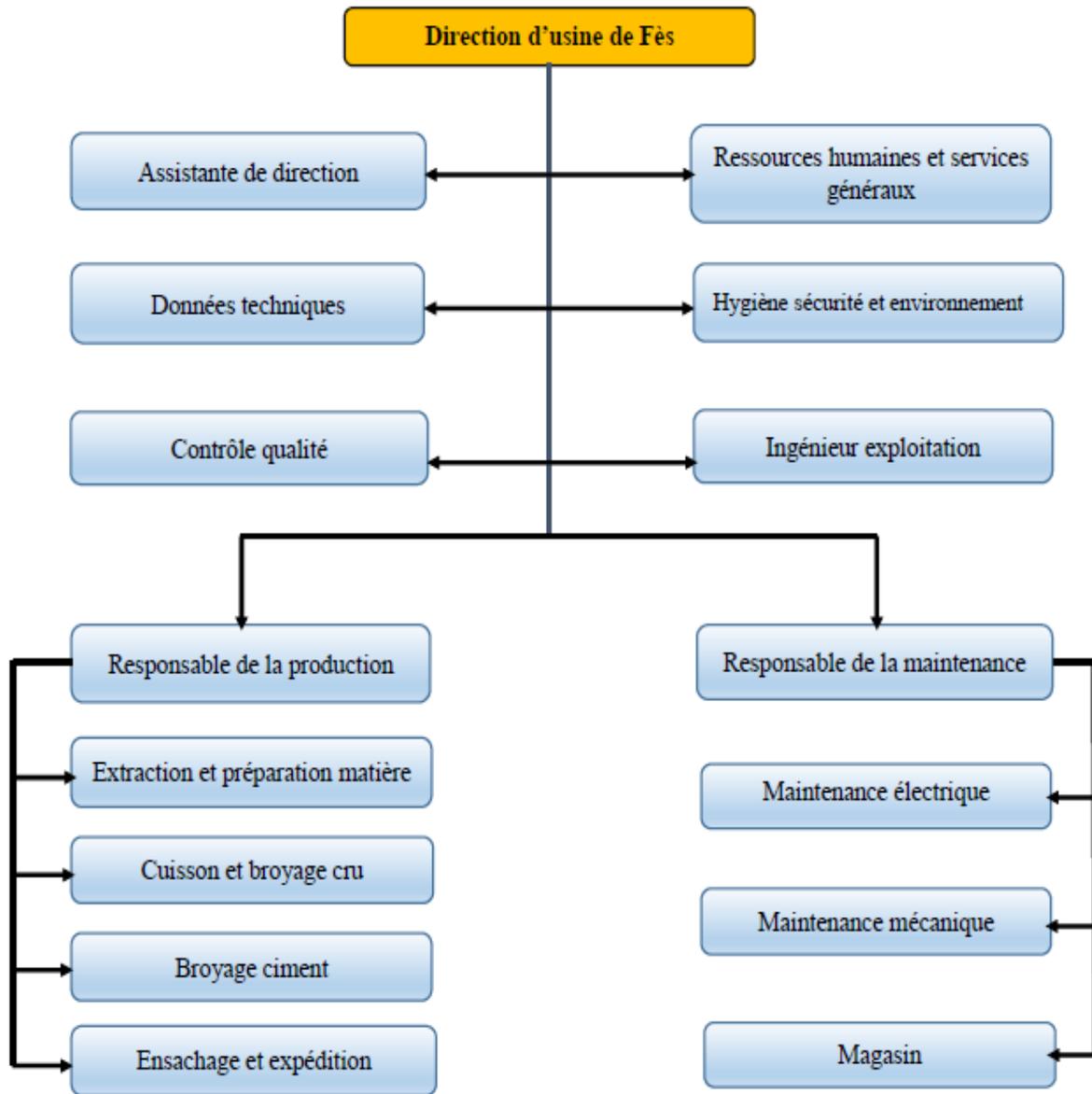
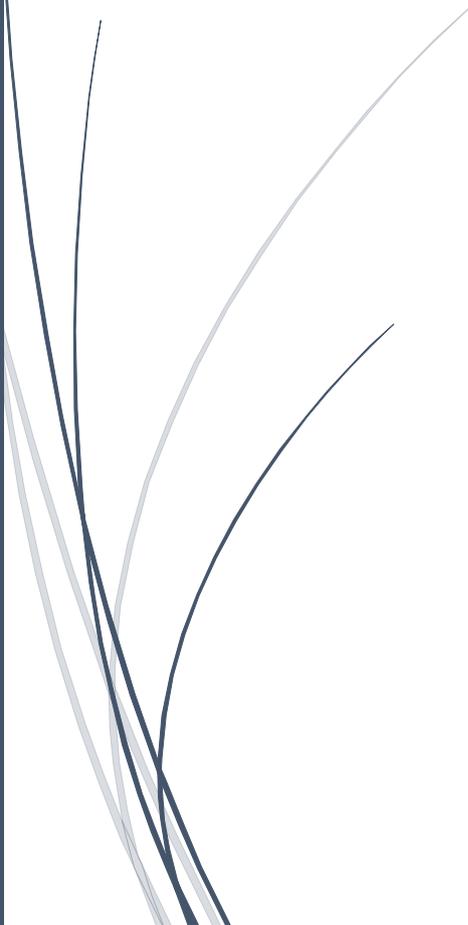


FIGURE 2: ORGANIGRAMME DE L'USINE LAFARGEHOLCIM -FES RAS EL MA

## Chapitre 2 :

# Description du Processus de fabrication du ciment & Présentation du Circuit du Broyage



## Chapitre 2 : Description du Processus de fabrication du ciment & Présentation du Circuit du Broyage

### I. Description du Processus de fabrication du ciment

#### 1. Le ciment

Selon la norme NF P 15-301 de 1994, le ciment se définit comme suit :

<< Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau.  
>>

#### 2. Les matières premières du ciment

L'usine de LafargeHolcim s'est installée à Ras El Ma en raison de la richesse de cette région en calcaire. Les matières premières (Figure 3) qui rentrent dans la fabrication du ciment sont presque toutes des carrières situées à proximité de la cimenterie afin de réduire les coûts de transport, et sont essentiellement composées de calcaire et d'argile ou de toutes matières renfermant essentiellement de la chaux (CaO), de la silice (SiO<sub>2</sub>), de l'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), de l'oxyde ferrique (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), la pouzzolane (matière volcanique) et les matières de correction (le sable et les minerais de fer).



FIGURE 3:LES COMPOSANTS DU CIMENT

#### 3. Le processus de fabrication du ciment

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

Le Ciment est généralement fabriqué en cuisant vers 1450 °C des mélanges de calcaire, d'Argile et minerais de fer. On obtient alors des nodules durs, appelés clinkers.

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

La production du ciment s'opère selon un processus en six étapes :

- Extraction des matières premières.
- Concassage et pré-homogénéisation des matières crues.
- Broyage et homogénéisation de la farine crue.
- Production du clinker.
- Broyage du ciment.
- Ensachage et expédition du ciment.

Le schéma de la figure 4 résume le processus de fabrication du ciment de la carrière à l'expédition.

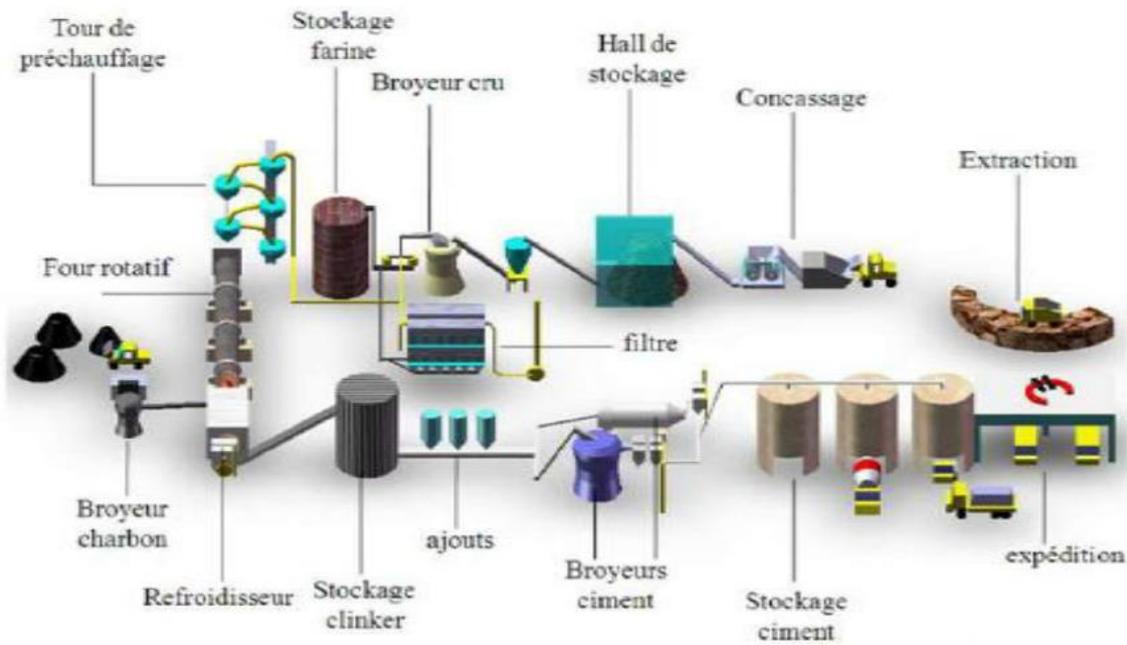


FIGURE 4:PROCESSUS DE FABRICATION DU CIMENT

## II. Présentation du Circuit du Broyage

### 1. Généralité

Le broyeur à galet de type vertical est un équipement adéquat pour le broyage et le séchage des matériaux humides. 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 et pouzzolane.

Le broyeur à galets de type vertical réalise 4 fonctions principales dans une seule machine : Le broyage, le séchage, la séparation et le transport.

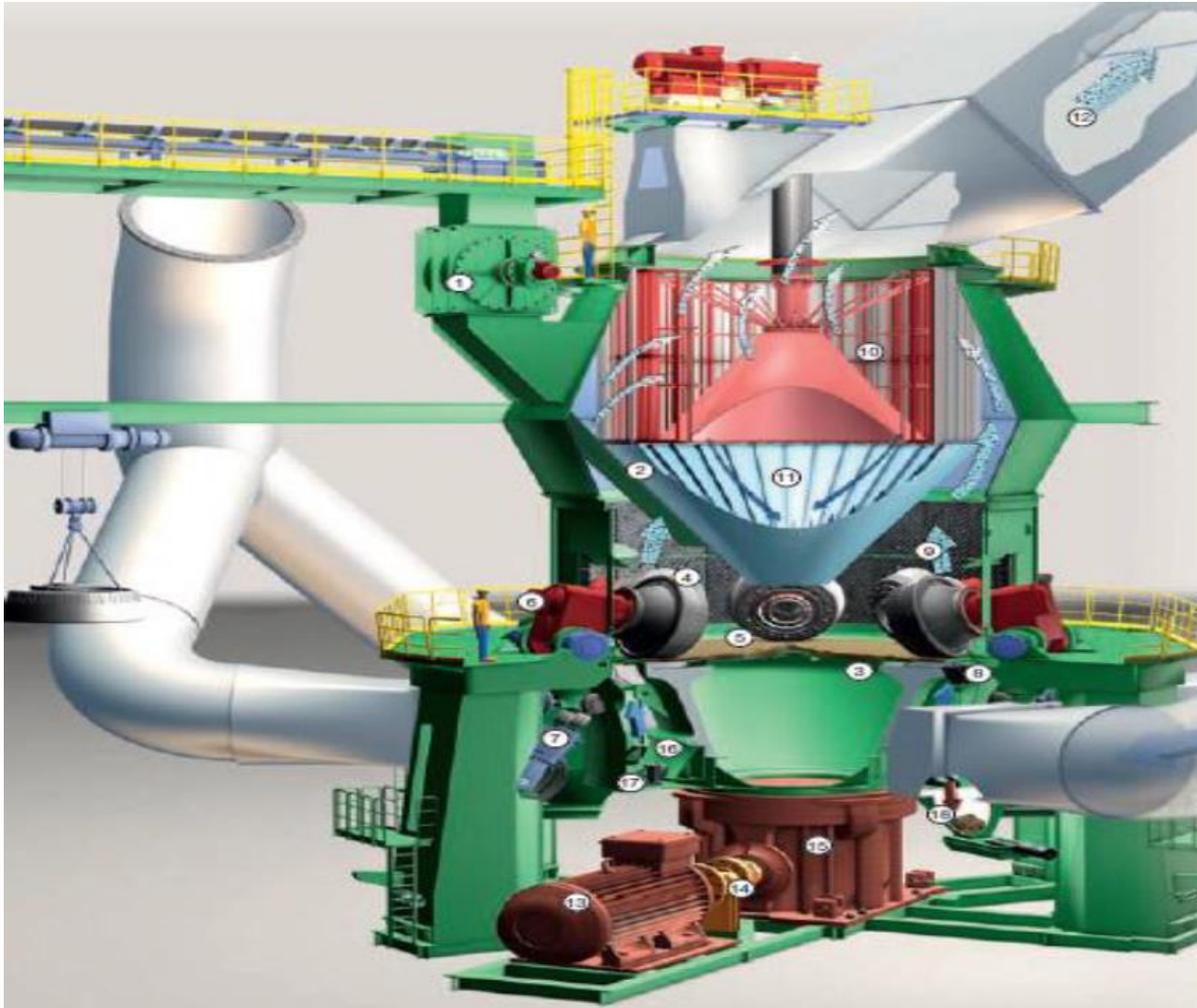


FIGURE 5 : BROYEUR VERTICAL A GALETS LOESCHE

## 2. Circuit de broyage

Le circuit de broyage est composé successivement des éléments principaux suivants :

- Des trémies recevant les matières à broyer (clinker; gypse; calcaire et pouzzolane)
- Des doseurs pour le dosage des proportions de matière qui vont composer le ciment spécifié (CPJ 35; CPJ45; CPJ55)
- Un broyeur vertical pour le broyage des matières entrantes
- Un filtre pour la récupération du ciment
- Un ventilateur pour la génération d'air pour la circulation de la matière à l'intérieur du circuit du broyage.
- Un générateur de gaz chaud pour le séchage des matières.

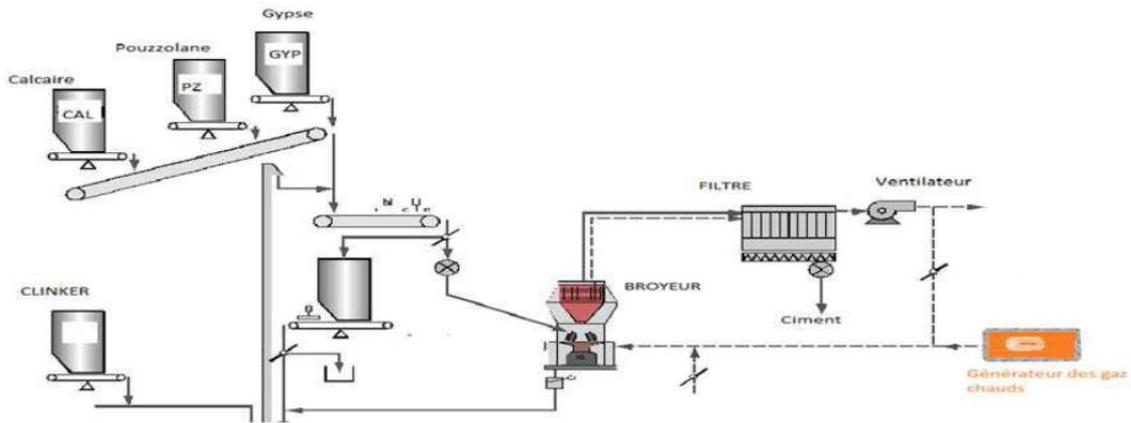


FIGURE 6:ATELIER DE BROYAGE DU CIMENT

### 3. Les principaux éléments du broyeur

Le broyeur LOESCHE pour le broyage de la farine crue ou du ciment est essentiellement constitué par :

- Les galets
- L'entraînement du broyeur
- La table
- Le séparateur
- L'injection d'eau
- Les gaz de séchage
- Le ventilateur.

#### Entrainement complet du broyeur

L'entraînement du broyeur se compose essentiellement des éléments suivants :

- Moteur du broyeur
- Réducteur du broyeur

Le réducteur du broyeur sert à entrainer un moulin à cylindres, pour réduire la vitesse de rotation du moteur électrique. Il existe un accouplement entre le moteur du broyeur et le réducteur du broyeur. Afin de protéger cet accouplement un exclue de tout contact involontaire avec les pièces en rotation lorsque le broyeur est en marche est nécessaire.

### Remarque :

Les deux moteurs du broyeur ciment et cru n'ont pas les mêmes puissances, celle du broyeur ciment est plus grande que celle du broyeur cru vue que le broyage du clinker nécessite une grande puissance.

### 3.1. Les galets de Broyeur LOESCHE

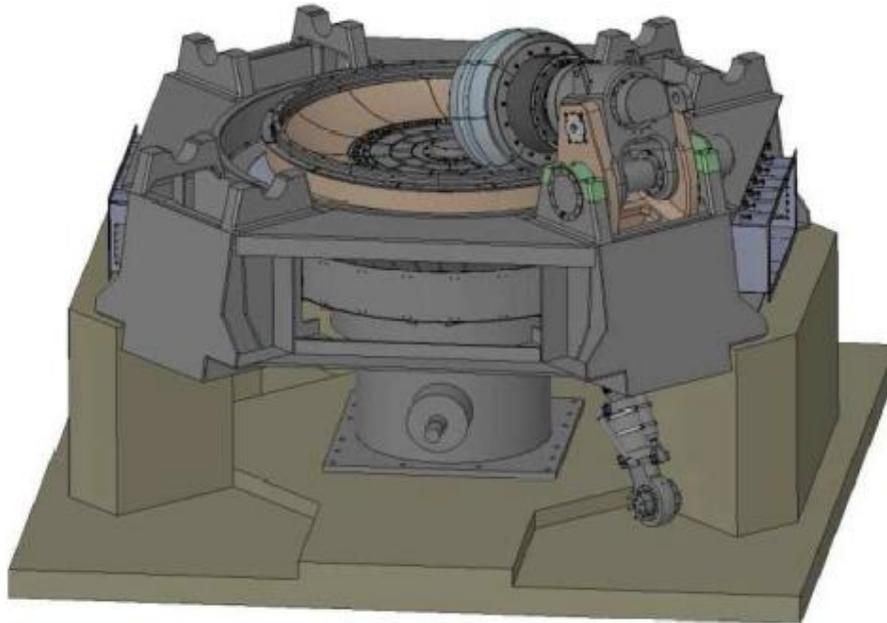
Le broyeur LOESCHE est équipé de 2 à 6 galets représentés dans la Figure 7, le broyeur cru à des galets de même taille or le broyeur ciment a des galets maîtres et des galets esclaves, ces derniers ont pour mission la préparation de la matière pour les galets maîtres. Pour des raisons énergétiques LafargeHolcim Ras-El-Ma n'utilise que les deux galets maîtres du broyeur Ciment.



FIGURE 7: LES GALETS DU BROYEUR LOESCHE

### 3.2. La piste (la table) du broyeur

La table de broyage s'appuie sur le réducteur et entraînée par ce dernier. La face supérieure du plateau est munie d'une plaque sur laquelle s'écoule la matière à broyer, le lit de broyage en rotation passant au-dessous des meules à emplacement fixe est exercé par celle-ci.



### 3.3. Le séparateur

Le séparateur LOESCHE à cage à barres (Figure 8) est un séparateur par courant d'air.

La matière broyée et séchée est acheminée par l'air de transport pour accéder au séparateur par en dessous (5). Les tôles de guidage intégrées au séparateur permettent de convertir le courant montant du mélange poussière/air en un courant tangentiel (3) Le rotor à barres du séparateur tourne dans le même sens que ce courant tangentiel. Ce qui génère dans l'espace (2) entre les tôles de guidage et les barres de séparation du rotor un champ de force centrifuge dans lequel s'effectue la séparation du mélange poussière/air.

Les particules de plus grande taille (fines) sont éjectées vers l'extérieur et chutent par gravité vers le bas (4). Le produit fini traverse le rotor à barres en même temps que le courant de gaz et quitte le séparateur via la sortie du bâti supérieur du séparateur (1).

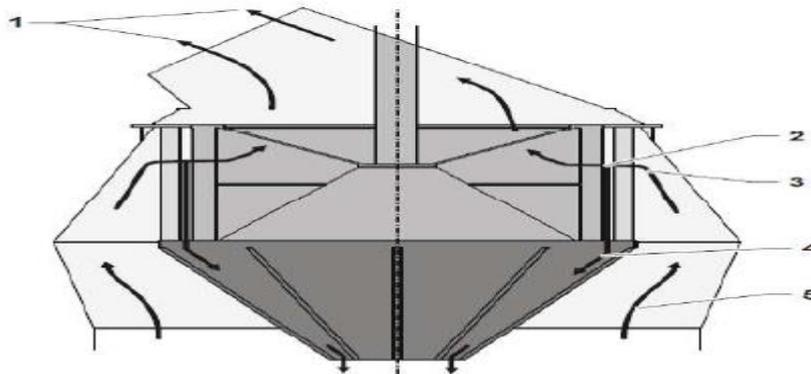


FIGURE 8:LE SEPARATEUR

## Chapitre 3:

# Présentation de sujet de stage

## Chapitre 3:Présentation de sujet de stage

### Introduction :

Ce chapitre consiste à cadrer le projet en définissant la problématique et donc le besoin de l'entreprise tout en utilisant les méthodes créatives.

### 1. Définition de la problématique

**Sujet :** Résolution de problème d'usure au niveau des broyeurs.

La problématique consiste à trouver une méthode de mesure d'usure pour les broyeurs et proposer des solutions pour le problème d'usure.

### 2. La précision du flou

Cette méthodes est une roue libre qui permet de libérer l'imagination afin d'exprimer des idées magiques. Pour cette phase on utilise les deux méthodes suivantes :

#### A. Trouver d'où vient le problème

- Le broyage d'une matière abrasive (clinker et Calcaire).
- les vibrations entre les galets et le lit de la matière entraînent des déformations et des arrachements par choc.
- Les charges appliquées (l'abrasion et la déformation plastique).
- La température de broyage (90 C / 300 C).
- L'arrosage de matière broyé.
- Les gazes chaudes qui viennent du Four.
- Turbulence de ciment.
- Vitesse d'extraction.
- Grippage du métal.

#### B. Présent State / Desired State (état présent/ état désiré)

L'état présent représente le point de départ avant la mise en œuvre d'un changement, d'un processus de développement personnel, d'une action de coaching ou d'une thérapie. L'état désiré représente le but à atteindre, la méthode créative (présent state/ desired state) sera appliquée.

**Tableau 3: Méthode present state/desired state**

Etat présent	Etat désiré
<ul style="list-style-type: none"><li>• Le broyeur BK4 est très usé notamment la piste (niveau d'usure élevé) et les galets (des arrachements remarquables).</li><li>• Baisse de débit de broyage.</li><li>• Dans le broyeur cru existe un problème de dégradation du métal de piste et des galets.</li><li>• Le broyeur ciment BK4 fonctionne 24h/24h.</li><li>• Le broyeur cru fonctionne par commande ou par lot.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Diminuer le taux d'usure.</li><li>• Augmenter la disponibilité.</li><li>• Atteindre le niveau broyage souhaité et le maintenir.</li><li>• Calculer le volume usé pour chaque relevé.</li><li>• Augmenter la rentabilité des broyeurs.</li></ul>

### 3. La recherche des données:

#### 3.1 Méthode 3QOCP

**Qui ? :** Qui est concerné par le problème ?

Qui a détecté le problème ?

- L'entreprise.
- Le service de maintenance mécanique.

**Quand ? :** Quand apparait le problème ?

- Au cours de broyage de ciment pour le BK4.
- Au cours de broyage du mélange (calcaire et argile) pour le broyeur cru.

**Quoi ? :** C'est quoi le problème ?

- Au niveau des broyeurs ciment et cru nous avons détecté un problème d'usure des galets et de la piste.

**Où ? :** Où apparait le problème ?

- A l'intérieur des Broyeurs ciment et cru (piste et bandage des galets).

**Pourquoi ? :** Pourquoi faut-il résoudre le problème ?

- Pour atteindre un bon débit de broyage.
- Pour une bonne rentabilité de produit broyer.
- Diminuer le coût total du ciment.
- L'amélioration continue de la production.

**Comment ? :** Comment allons-nous résoudre le problème ?

- Nous allons faire une étude de l'état actuel de système de Broyage.
- Quantifier les racines de cette usure.
- Mesurer cette l'usure.
- Identifier les solutions pour le problème dans d'autres cas.

## 3.2 La recherche documentaire

### A. Définition d'usure

Dans la science des matériaux, l'usure des surfaces désigne le phénomène de dégradation des couches superficielles d'un solide sous l'action mécanique du milieu extérieur. Cette dégradation est souvent associée aux phénomènes chimiques dus à la corrosion, elle peut prendre la forme d'une perte de masse, de cote, de forme, ou encore d'une modification de la structure. L'étude des phénomènes d'usure est un des domaines de la tribologie.

### B. Les types d'usures mécaniques

#### 1. Usure abrasive: définition

L'usure abrasive est généralement engendrée soit par des particules préexistantes (matériaux granulaires), soit par des débris écrouis (ou protubérances) emprisonnés à l'interface du contact. On distingue ainsi suivant l'application, différents types de configuration, de sollicitation et de milieu. L'étude de ces différents paramètres et leurs influences est apparue intéressante pour comprendre et maîtriser l'usure abrasive.

#### ✚ Configurations de contacts

Les contacts réels sont généralement complexes. Selon la configuration mécanique on distingue : l'abrasion à deux corps, l'abrasion à trois corps fermée et l'abrasion à trois corps ouverte.

##### ➤ Usure abrasive à deux corps

L'usure abrasive à deux corps (Fig. 9) Est un processus d'usure par déplacement et/ou enlèvement de matière de la surface frottant d'une pièce mécanique sous l'action d'aspérités dures fixes. Une aspérité de la surface la plus dure raye la surface la plus tendre. L'abrasion à deux corps concerne certains secteurs, gros consommateur d'énergie et de matières ou encore les techniques d'enlèvement de matière volontaire, que l'on veut maîtriser, les problèmes d'abrasion à deux corps ont fait l'objet d'études nombreuses et approfondies. Elle est surtout connue pour ses aspects négatifs. Elle présente toutefois un aspect positif recherché dans de nombreux procédés d'usinage (machine à outil, polissage).

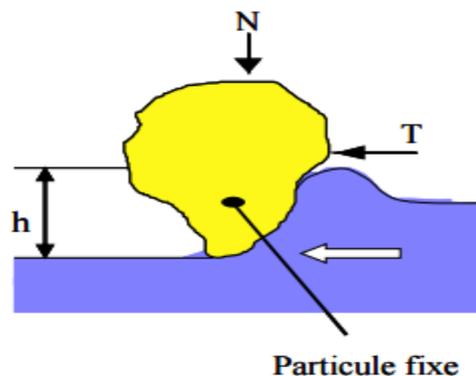
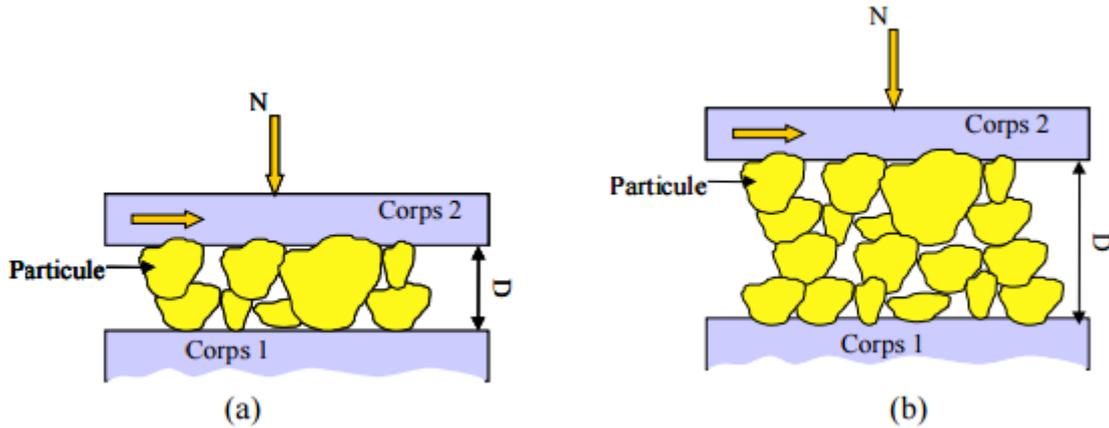


FIGURE 9: ABRASION A DEUX CORPS

➤ Abrasion à trois corps fermée

L'usure abrasive à trois corps fermée est générée lorsqu'on frotte deux surfaces avec interposition d'abrasifs libres (Fig. 10). Dans les configurations d'abrasion à trois corps, il faut distinguer deux cas : - la distance entre les surfaces est du même ordre de grandeur que la dimension des grains abrasifs ( $D \leq D_{\max \text{ grain}}$ ), - la distance entre les surfaces est supérieure à la dimension des grains ( $D > D_{\max \text{ grain}}$ ).



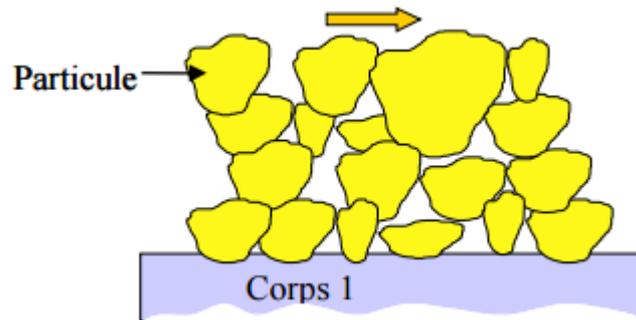
**FIGURE 10: ABRASION A TROIS CORPS FERMEE : (A)  $D \leq D_{\max \text{ GRAIN}}$  ET (B)  $D > D_{\max \text{ GRAIN}}$**

Dans le premier cas  $D \leq D_{\max \text{ grain}}$ , les deux surfaces sont également exposées à l'abrasion et le comportement de chaque surface réagit sur l'autre. L'incrustation de particules dures dans une surface tendre ou leur imbrication dans une surface dure écaillée peut transformer le processus en une abrasion à deux corps. Le phénomène de broyage peut être aussi observé avec ses effets secondaires sur la sollicitation : élimination des arêtes vives, ou au contraire, formation de nouvelles arêtes actives selon la sollicitation et le mode de fragmentation du grain. Dans cette configuration les deux surfaces subissent immédiatement les chocs éventuels qui peuvent les détériorer de façon importante si le granulat est dur et peu fragile.

Dans le second. Cas où  $D > D_{\max \text{ grain}}$ , les propriétés mécaniques d'une surface n'ont plus d'incidence directe sur l'autre, l'abrasion ne peut être localisée que sur une seule des surfaces. Le comportement rhéologique du corps à l'interface devient alors prépondérant.

➤ Abrasion à trois corps ouverte

Dans le cas de l'abrasion à trois corps, si une seule surface intervient dans le processus de frottement, on parle d'usure abrasive à trois corps ouverte (Fig. 11). Ce type de configuration est souvent rencontré dans le cas de matériaux granulaires en contact avec un solide.



**FIGURE 11: ABRASION A TROIS CORPS OUVERT**

Les configurations mentionnées supposent toutes la présence de corps abrasifs. Il faut noter, que la présence de ces corps abrasifs peut être accidentelle, le plus souvent il s'agit de poussières. En revanche, certaines sollicitations de contact, initialement exemptes de particules abrasives, peuvent elles-mêmes les générer par oxydation des débris. Les contacts réels sont généralement plus complexes et la coexistence de l'abrasion à deux et trois corps est souvent rencontrée.

C'est suivant les mouvements relatifs des particules abrasives qu'on peut avoir soit une abrasion à deux corps, soit une usure abrasive à trois corps. Si les particules glissent sans rotation par rapport à la surface alors on parle d'usure abrasive à deux corps. Si les particules ont des mouvements de rotation par rapport à la surface, alors on parle d'usure abrasive à trois corps. Les mouvements relatifs des particules abrasives dépendent à la fois de leur géométrie, de leurs propriétés mécaniques, des conditions de sollicitation et des propriétés des interfaces.

## **2. Usure par adhésion : définition**

Le mécanisme d'adhésion (voir Figure 12) est une usure par transfert de matière d'une surface sur l'autre pendant leur mouvement relatif, due à un processus de soudure en phase solide.

La matière d'une pièce est transférée sur l'autre pendant le mouvement, par soudage en phase solide. Les métaux, s'ils sont mutuellement solubles, forment des alliages par diffusion.

- Si l'interface est moins solide que les pièces, les jonctions se cisailent par rupture adhésive, l'usure est modérée ou quasi nulle.
- Si l'interface est plus solide qu'une des pièces, il y a rupture cohésive, usure sévère, voire grippage. L'interface se fixe sur la pièce la plus résistante ou se détache sous forme des particules qui, écrouies et oxydées, peuvent contribuer à l'adhésion.

On sait calculer ou mesurer la force d'attraction entre deux matériaux mais pas la force de décohéation une fois le contact établi. La séparation par décohéation ne se fait pas d'un coup mais se propage comme une fissure ; le frottement vient de la force requise pour cisailier les jonctions.

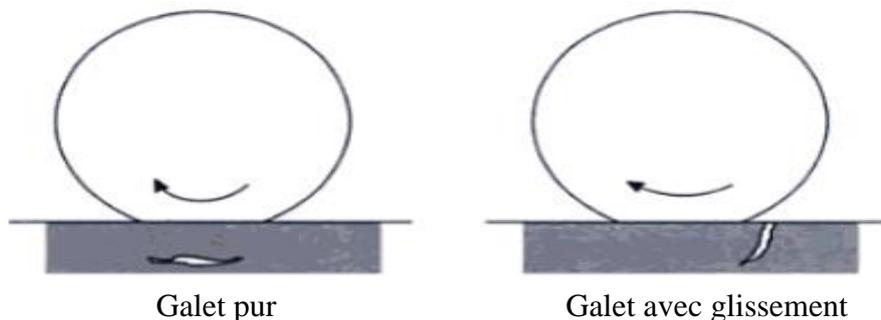


FIGURE 12: USURE DU ROULEMENT PAR ADHESION

### 3. Usure par fatigue

L'endommagement des surfaces par fatigue de contact se manifeste lorsque les couches superficielles sont soumises à des contraintes répétées ou alternées qui conduisent à l'amorçage des fissures. Ces sollicitations peuvent être d'origine mécanique ou thermique.

Les dégradations apparaissent sous forme des piquûres, fissures, écaillage et s'accompagnent des modifications structurales. Les avaries par fatigue ou petits débattements se rattachent à ce type de mécanisme



Sous l'effet d'un galet pur, en raison de la localisation du point d'Hertz, on observe des fissures parallèles à la surface (contraintes de cisaillement maximales) ; en présence d'un glissement, on observe des fissures superficielles perpendiculaires à la surface (contraintes de traction maximale, voir Figure 13).

### 4. Usure par corrosion

Ce type d'usure intervient dans les situations où le contact fonctionne en environnement corrosif. L'énergie dissipée dans le contact peut alors activer les phénomènes de corrosion et accélérer la dégradation des surfaces. Il n'est pas évident de trouver une bonne illustration des faciès caractéristiques de ce phénomène, mais d'une manière générale, il faut chercher sur les faciès l'indice d'une activité de la corrosion.



FIGURE 13: MECANISME D'USURE PAR CORROSION

### 3.3. Les appareils de mesure d'usure

D'après notre recherche nous avons trouvé des appareils de tom tom Tools qui permet de mesurer l'usure.

La figure ci-dessous illustre des appareils de mesure d'usure:

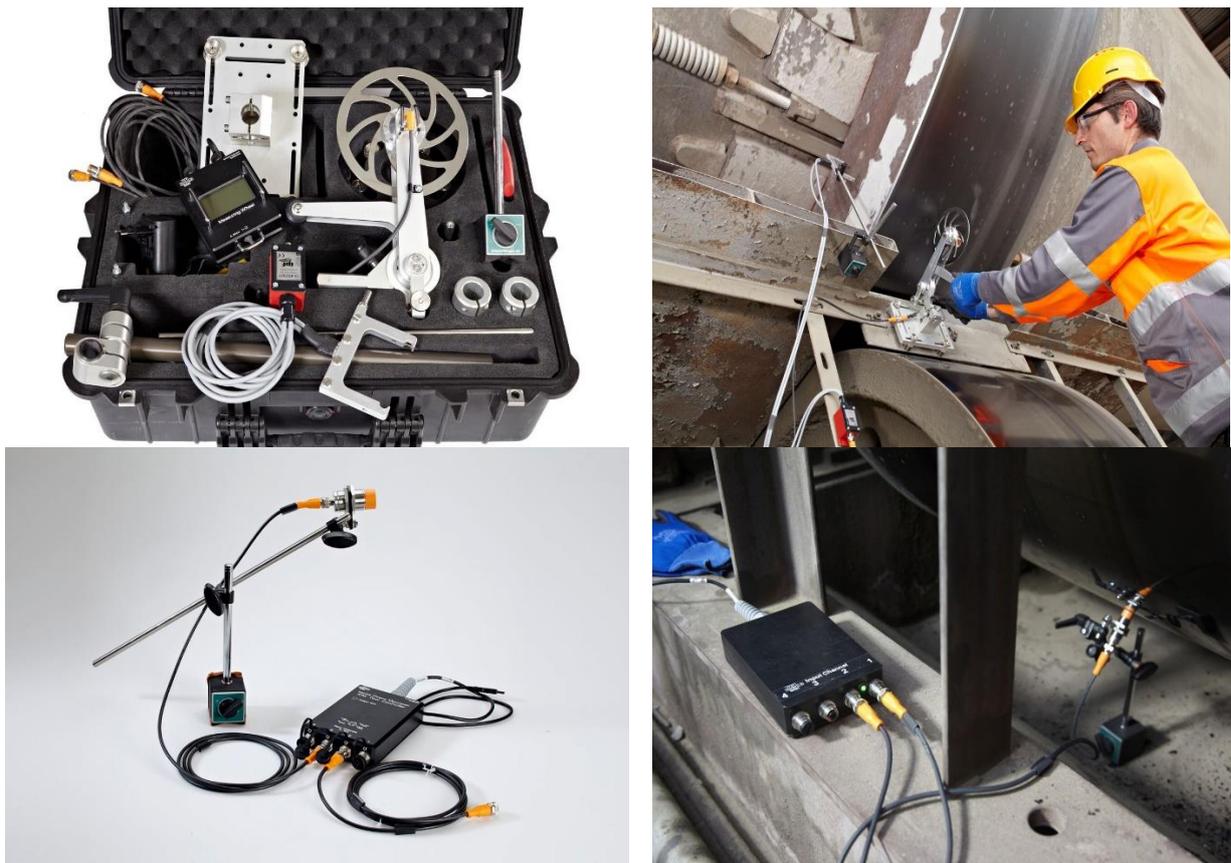
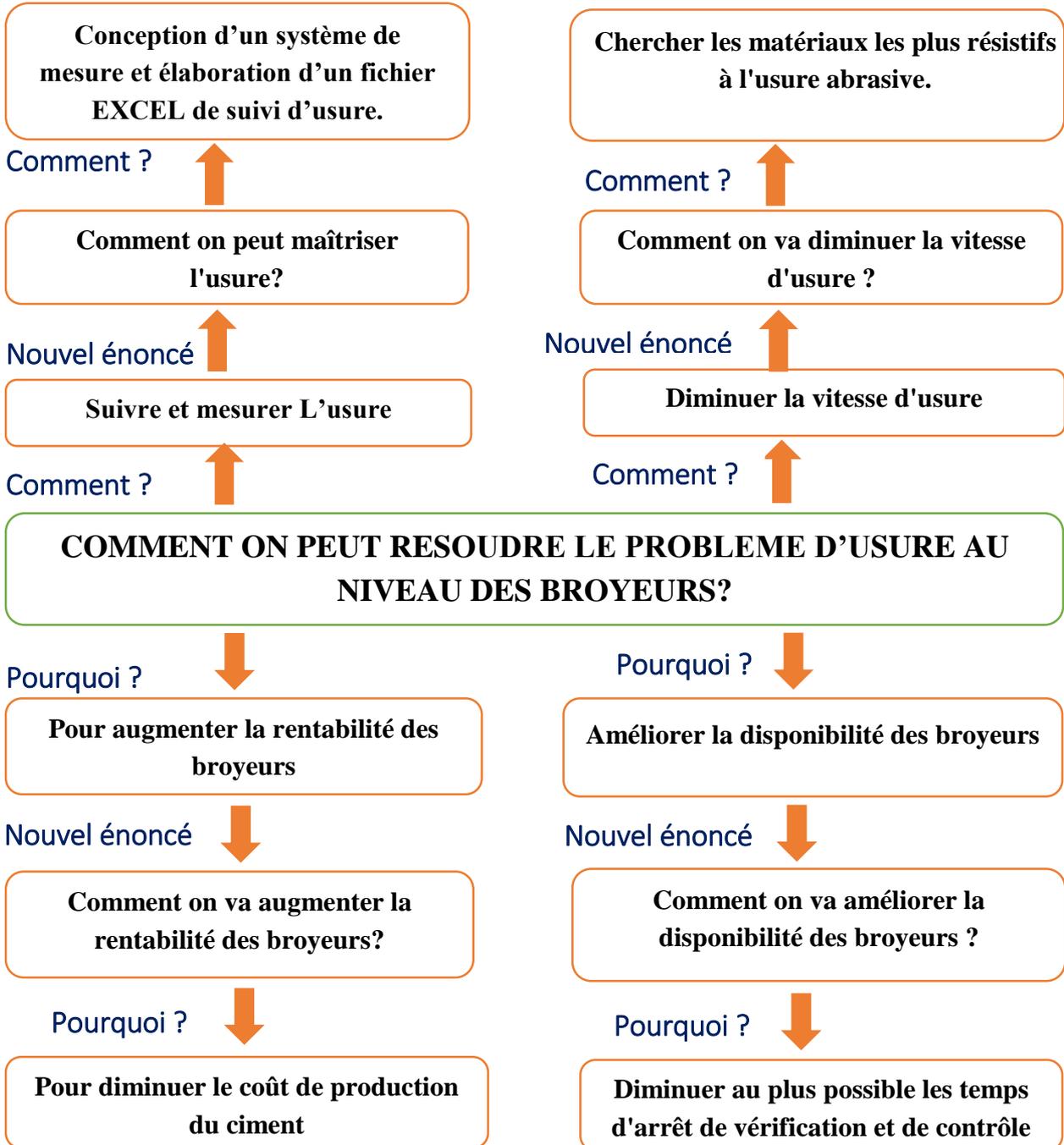


FIGURE 14: LES APPAREILS DE MESURE D'USURE

## 4. Enoncé du problème

### 4.1. La divergence

a) *Echelle d'abstraction*



## NOUVELLE ENONCE DU PROBLEME

Comment on peut maîtriser l'usure jusqu'à le temps qu'on va le diminuer d'une façon permanente

## 5. La recherche des idées

### 5.1. La divergence

#### ✚ Brainstorming

On se pose la quantité d'idées :

- A. Poser des repères niveau bas, niveau haut.
- B. Conception d'un système de mesure d'usure.
- C. Percer des petits trous et à chaque fois, calculer la profondeur et remonter le niveau d'usure.
- D. Changer le matériau par un autre qui résiste plus à l'usure.
- E. Acheter un nouveau broyeur.
- F. Changer le broyeur vertical par un autre à boulet.
- G. Effectuer un rechargement avec un matériau dure que la matière broyer.

## 6. Mise en application

### 6.1. La divergence

Première tâche : identifier nos sources d'appui et nos points de résistance

#### ➤ Méthode des 3Q + OP

	SOURCES D'APPUI	POINTS DE RESISTANCE
<b>QUI</b>	L'encadrant ,les ingénieurs et les techniciens ...	les mal-collaborateurs.
<b>QUAND</b>	Au cours de la période de stage	l'intervalle de temps est court pour le suivi des solutions.
<b>QUOI</b>	Application des solutions proposées	Les Contraintes de réalisations de projet et les exigences de la société.
<b>Où</b>	L'entreprise (service de maintenance mécanique et Bureau de méthode)	Bureau d'étude ,Bureau de méthode, l'atelier
<b>POURQUOI</b>	Maîtriser et diminuer le problème d'usure .	Niveau d'usure augmente au niveau de broyeurs.

Deuxième tâche : générer une liste d'actions potentielles

- Planification du changement de la piste pour Broyeur ciment sur SAP.
- Identifications des pièces de rechange.
- Lancement des demandes d'achats.
- Proposition pour le démontage de la piste usé et rechargé.
- Conception d'un système de mesure d'usure.
- Elaboration des fiches de suivi d'usure (EXCEL) avec des indicateurs sur l'état d'usure des broyeurs.
- Proposition des nouveaux concepts piste et bandages galets résistant plus à l'usure.
- Choix des matériaux résistant plus à l'usure à l'aide de l'outil CES.
- Proposition des concepts relativement économique.
- Etude économique des solutions proposées.

## 6.2 La convergence

La séquence d'action :

Court terme	Moyen terme	Long terme
Planification du changement de la piste Broyeur ciment sur SAP (Identifications des pièces de rechanges , lancement des demandes d'achat, proposition pour le démontage de la piste usé et rechargé).	Conception d'un système de mesure et élaboration des fiches de suivi d'usure (EXCEL) avec les indicateurs sur l'état d'usure des broyeurs (Dans le but d'améliorer la politique de rechargement)	Proposition des nouveaux concepts piste et galets résistant plus à l'usure  (Choix des matériaux résistant plus à l'usure par l'outil CES, proposition des concepts relativement économique).

## Chapitre 4 :

# Eude et conception d'un appareil de mesure d'usure

## Chapitre 4 : Eude et conception d'un appareil de mesure d'usure

### Introduction :

Dans cette partie on va présenter le système qui permet de mesurer l'usure (Gabarit) au niveau de la piste et des galets, par la suite nous allons proposer une amélioration de celle-ci.

### 1. Généralité sur le Gabarit :

C'est un outil qu'a la forme d'une vue en coupe du bandage galet, par lequel on mesure le jeu créé par l'usure entre le bandage et la partie intérieure du gabarit ; Le Gabarit de la piste a la forme de la lettre L. On pose ses deux extrémités sur deux faces qu'on suppose non usée, et on mesure la distance entre un plan de référence et le plan usé.



FIGURE 15: SYSTEME ACTUEL DE MESURE D'USURE UTILISE POUR LES GALETS ET LA PISTE

### 2. Problématique :

Le problème se pose quand l'opérateur veut prendre des mesures d'usure, il trouve des difficultés de fixation et de positionnement du concept, ainsi il perd toujours les repères initiales qu'il a utilisé en cas de rechargement des galets et de la piste (première mesure), il fait aussi des erreurs pendant la lecture de chaque mesure, ce qui donne des fausses mesures d'usure, par conséquent il obtient d'après les calculs des erreurs pour le volume usé.

La figure ci-dessus illustre la méthode utilisé à LafargeHolcim de Ras el Ma Fès pour mesurer l'usure des galets et de la piste pour les broyeurs cru et ciment :



**FIGURE30:LA METHODE ACTUELLE DE PRISE DE MESURE D'USURE**

**Remarque :**

Suite à ces nombreux problèmes rencontrés au niveau de ce système, nous avons proposé de faire un nouveau concept qui facilite la prise de mesure.

### **3. Analyse fonctionnelle**

L'analyse fonctionnelle est une démarche qui « consiste à rechercher et à caractériser les fonctions offertes par un produit pour satisfaire les besoins de son utilisateur. »

#### **3.1. Recherche des fonctions**

La recherche des fonctions constitue la phase base de l'analyse fonctionnelle, pour rechercher les fonctions du présent projet nous allons utiliser la méthode RESEAU.

##### **R:Recherche intuitive**

La recherche intuitive des fonctions s'est faite au cours d'une réunion d'initiation avec un opérateur, les fonctions relevées sont les suivantes:

**Tableau 4: recherche intuitive**

N°	Fonction
<i>FP1</i>	Mesurer l'usure.
<i>FC1</i>	Tenir compte des moyens à disposition pour la fabrication de système.
<i>FC2</i>	Utiliser des matériaux résistants aux différentes sollicitations qu'ils peuvent rencontrer sur le système.
<i>FC3</i>	Utiliser des composants standards dans la conception du gabarit.
<i>FC4</i>	diminuer au maximum le coût.
<i>FC5</i>	Améliorer le système de mesure grâce à la veille technologique mise à disposition.
<i>FC6</i>	Utiliser un appareil de mesure existant.
<i>FC7</i>	Etre simple à régler/réparer.
<i>FC8</i>	Utiliser les moyens existant pour régler et assembler le concept.
<i>FC9</i>	Facile en montage/démontage.
<i>FC10</i>	S'adapter à la source d'énergie.
<i>FC11</i>	Résister au milieu extérieur (poussière, température, graisse, chocs ...).
<i>FC12</i>	Garantir la sécurité des opérateurs.
<i>FC13</i>	Garantir la qualité de prise des mesures.
<i>FC14</i>	Concept fonctionne à longue durée de vie.
<i>FC15</i>	Système avec un poids léger.

FP: fonction principale

FC: fonction contrainte

### **E: Examen de l'environnement**

On l'appelle aussi la méthode des interacteurs, un produit franchira plusieurs étapes. Il se trouvera alors en interaction avec des lieux, des systèmes, et des gens différents. Il devra s'adapter à ces contextes, de manière à continuer à rendre les services attendus.

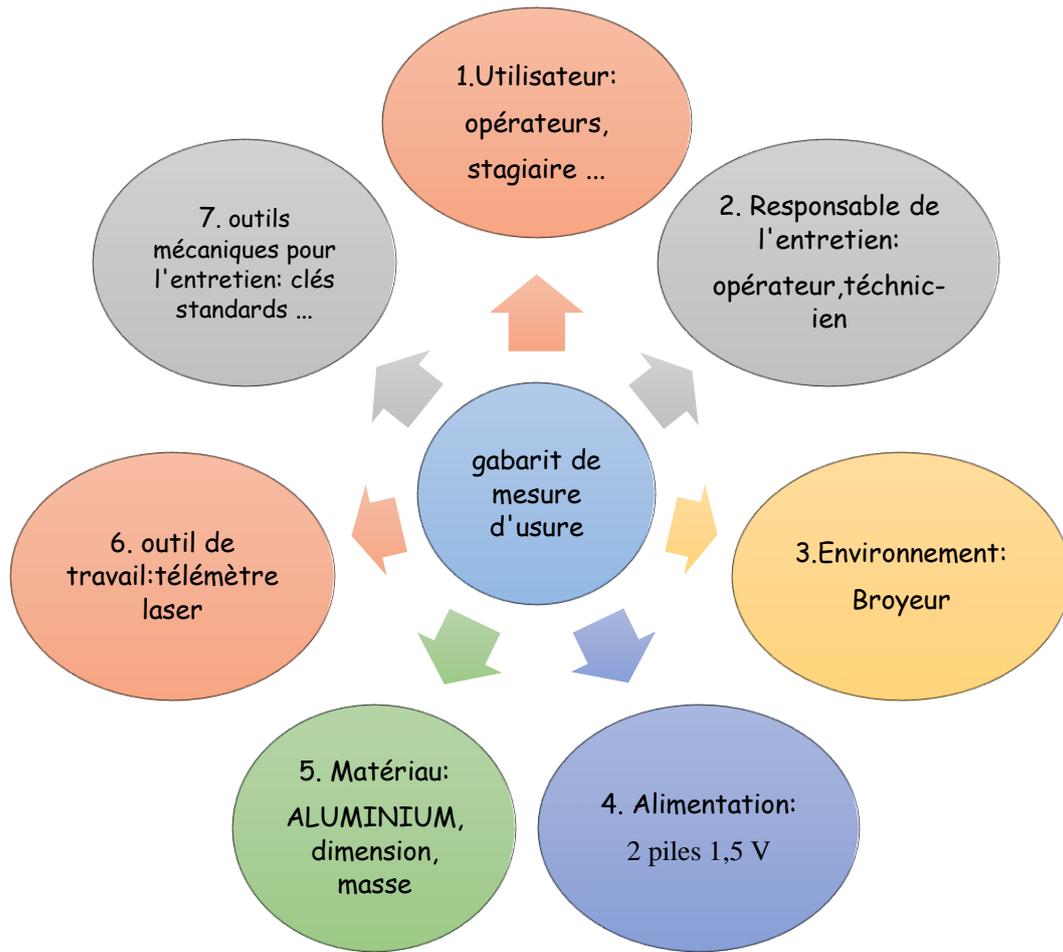


FIGURE 16: GRAPHE DES INTERACTIONS OU DIAGRAMME PIEUVRE

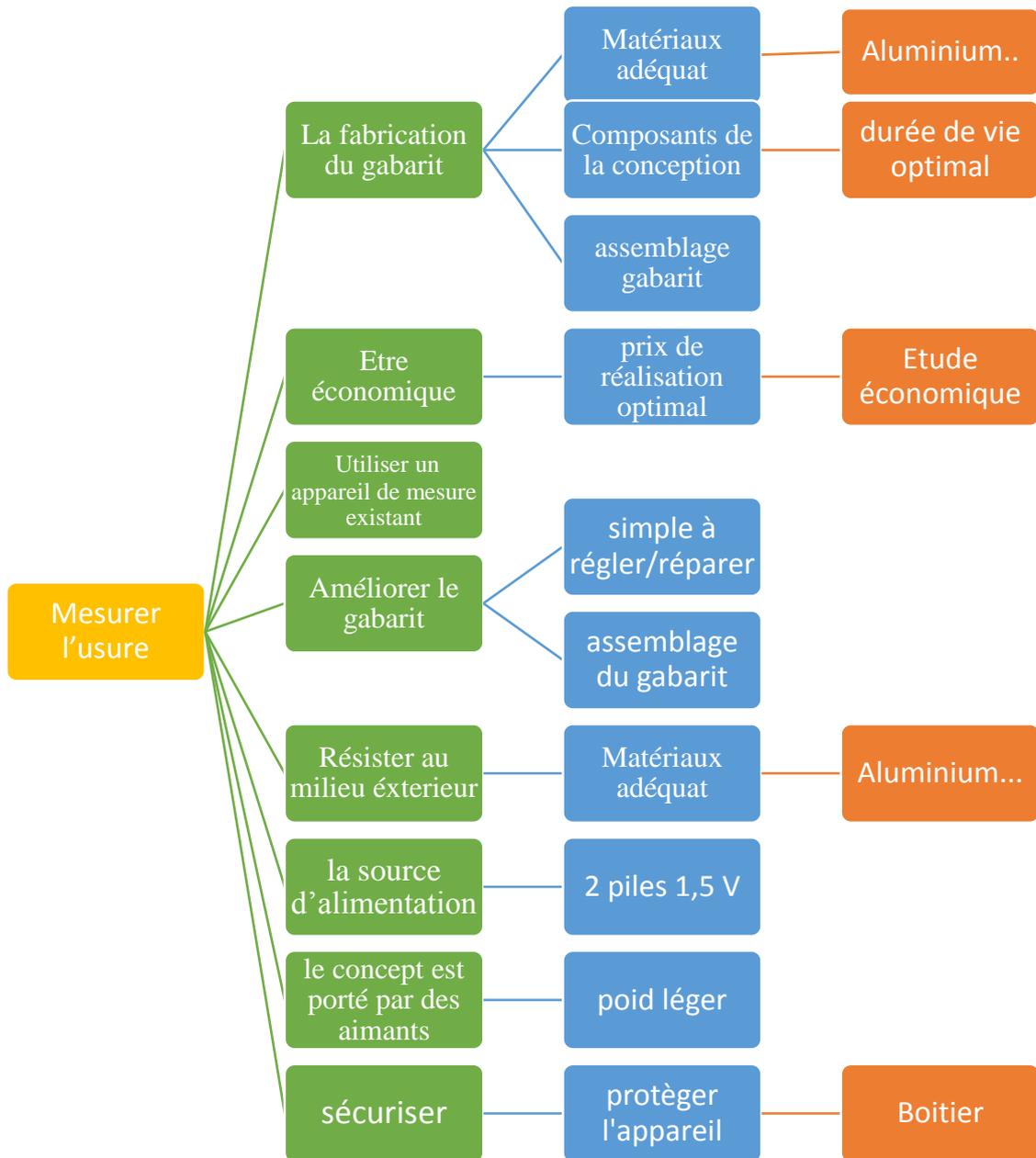
### 3.2. Ordonner les fonctions

#### Classement des fonctions suivant KANO

L'identification des fonctions mène toujours à faire une classification entre les fonctions pour qu'on puisse saisir vraiment l'utilité de cette fonction, ici nous avons vu le modèle de Kano où on distingue quatre fonctions, mais on a seulement généré les fonctions de performance et d'innovation qu'on peut schématiser comme suit :

N°	Fonction	Type de fonction	Commentaires
<i>FP1</i>	Mesurer l'usure.	Usage	Fonction principal, arbre fonctionnel
<i>FC1</i>	Tenir compte des moyens à disposition pour la fabrication de système.	Contrainte	Aimant permanent...
<i>FC2</i>	Utiliser des matériaux résistants aux différentes sollicitations qu'ils peuvent rencontrer sur système.	Contrainte	Aluminium...
<i>FC3</i>	Utiliser des composants standards dans la conception de gabarit.	Contrainte	Taille des pièces.
<i>FC4</i>	Contenir au maximum le coût.	Contrainte	Etude économique
<i>FC5</i>	Améliorer du système grâce à la veille technologique mise à disposition.	Technique	Utiliser le télémètre laser au lieu de pied à coulisse
<i>FC6</i>	Utiliser des appareils existants.	Technique	Télémètre laser, aimant METRICA...
<i>FC7</i>	Etre simple à régler/réparer.	Technique	Utiliser un mode opératoire
<i>FC8</i>	Utiliser les moyens existant pour régler et assembler le concept.	Contrainte	Réalisable et fonctionnel
<i>FC9</i>	Facile en montage/démontage.	Contrainte	Réalisable et fonctionnel
<i>FC10</i>	S'adapter à la source d'alimentation.	Contrainte	2 piles 1,5 V
<i>FC11</i>	Résister au milieu extérieur (poussière, température, graisse, chocs ...).	Contrainte	Pochette de protection
<i>FC12</i>	Garantir la sécurité des opérateurs.	Contrainte	Arrondir les arrêts
<i>FC13</i>	Garantir la qualité de prise des mesures.	Contrainte	La simplicité d'utilisation
<i>FC14</i>	Système avec un poids léger.	Contrainte	Matériau utilisé : Aluminium, fonte ...
<i>FC15</i>	Concept fonctionne à longue durée de vie.	Contrainte	Matériaux inoxydables

**Arbre fonctionnel**



**FIGURE 17: ARBRE FONCTIONNEL**

### 3.3. Caractérisation des fonctions

Repères	Les Fonctions	Critères de conception	Niveau	Flexibilité
<b>FP1</b>	Mesurer l'usure	la précision du système de mesure	0,5 mm	Max
<b>FC1</b>	Tenir compte des moyens à disposition pour la fabrication de système.	des pièces standards, Outillages disponibles	Disponibilité	Max
<b>FC2</b>	Utiliser des matériaux résistants aux différentes sollicitations	Ne se déforme pas pendant l'utilisation	Résistance des matériaux	Max
<b>FC3</b>	Utiliser des composants standards dans la conception du gabarit	Composants accessibles à tout le monde Disponibilité rapide	Prix raisonnable	Min
<b>FC4</b>	Contenir au maximum le coût	Pièces Matières premières	500DH	±200 DH
<b>FC5</b>	Améliorer du système grâce à la veille technologique			Min
<b>FC6</b>	Utiliser un Appareil existant	Appareil performant	Dimensions petites	Min
<b>FC7</b>	Etre simple à régler/réparer	Notices de montages Assemblage simple	2 à l'échelle de 10	Max
<b>FC8</b>	Utiliser les moyens existant pour régler et assembler le concept.	Disponibilité		Max
<b>FC9</b>	Placer l'appareil sur le gabarit	Encombrement	dimension inférieur à 50*150 mm	Max
<b>FC10</b>	Adapter à la source d'alimentation	fonction par des piles électrique	1,5V	Min
<b>FC11</b>	Résister aux agressions du milieu	Résister à la poussière, et la vibration	vibration inférieur à 0,05 mm/s	Max
<b>FC12</b>	Garantir la sécurité des opérateurs	Respecte les normes de sécurité	zéro accident	Max
<b>FC13</b>	Garantir la qualité de prise des mesures.	Précision du système	0,5 mm	Max
<b>FC14</b>	Système avec un poids léger.	Masse volumique du matériau	7100 kg/m <sup>3</sup>	Min
<b>FC15</b>	Concept fonctionne à longue durée de vie.	La dureté du matériau	Infini	Min

**La maison de qualité.**

		Matière des pièces	des pièces standards Outillages disponibles	Ne casse pas en utilisation normale	Disponibilité rapide	Pièces Matières premières	Les nouveautés de technologiques	Appareil performant	Notices de montages, Assemblage simple, Et Pièces standards	Disponibilité	Encombrement	fonction par des piles électrique	Résister à la poussière, aux	Respecte les normes de sécurité	Précision de l'appareil	Masse volumique du matériau	La dureté du matériau
		↑	↑	↑	↓	↓	↓	↑	↑	↑	↑	↓	↑	↑	↑	↓	↑
FP1	Mesurer l'usure	●	■			●		●		▲			■				
FC1	Tenir compte des moyens à disposition pour la fabrication de système		●				■	■	●	●	■	■	▲				■
FC2	Utiliser des matériaux résistants aux différentes sollicitations qu'ils peuvent rencontrer sur le système	●	■	●		■				▲							
FC3	Utiliser des composants standards dans la conception de gabarit		●				▲	▲	●	■	▲	▲	▲			■	
FC4	Contenir au maximum le coût			■	■	●	■										
FC5	Améliorer le système grâce à la veille technologique mise à disposition						●	●	●								
FC6	Utiliser un Appareil existant						▲	●							■		
FC7	Etre simple à régler/réparer		■	▲					■	▲					▲		
FC8	Utiliser les moyens existant pour régler et assembler le concept		■	■		▲			▲					▲			
FC9	Placer l'appareil sur le gabarit									■	▲	■	■				
FC10	S'adapter à la source d'alimentation											●					
FC11	Résister aux agressions du milieu environnant							■				●					
FC12	Garantir la sécurité des opérateurs																
FC13	Garantir la qualité de prise des mesures.					■		●		■							
FC14	Système avec un poids léger.												●			●	
FC15	Concept fonctionne à longue durée de vie.	●		●		▲			▲		■	▲					

	FP1	FC1	FC2	FC3	FC4	FC5	FC6	FC7	FC8	FC9	FC10	FC11	FC12	FC13	FC14	FC15
0,5 mm																
Disponibilité																
Résistance des matériaux																
Prix raisonnable																
600DH (partie)																
Connectivité internet																
Prise en main																
Eviter les outils spéciaux																
Disponibilité																
inférieur*150 mm																
1,5V																
inférieur à 0,05 mm/s																
zéro accident																
0,5 mm																
7100 kg/m <sup>3</sup>																
Infini																
	70%		75%	80%	25%	30%	32%	60%	80%	75%	25%	85%	75%	30%	25%	35%

: Liaison forte

: Liaison moyenne

: Liaison faible

## 4. Etude conceptuelle

### 4.1 La matrice morphologique

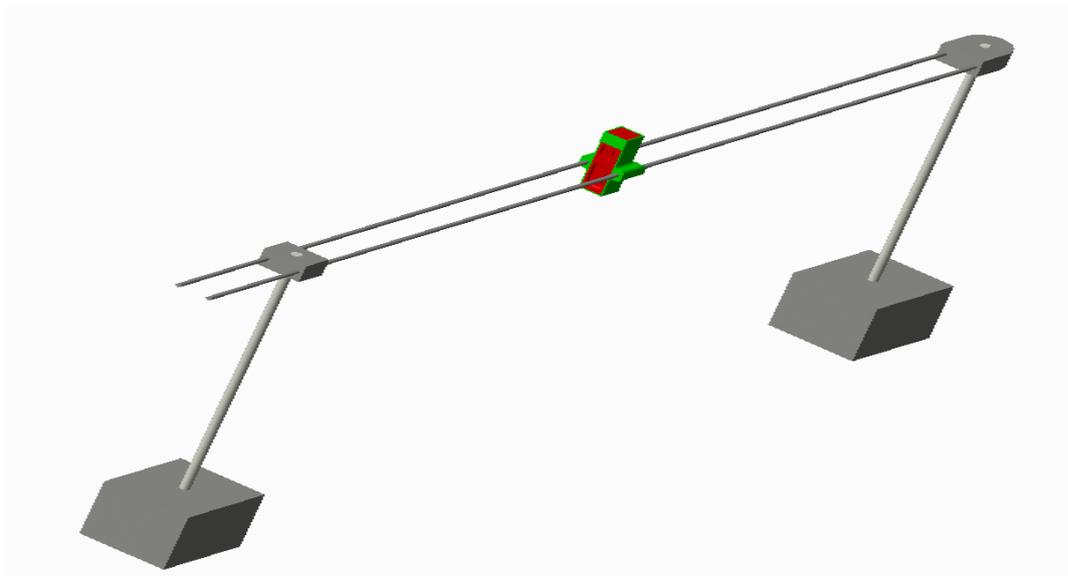
La matrice morphologique nous a permis de faire une confrontation des différents concepts pour en sortir le mieux adapté à notre projet. Pour cela nous avons répertorié les fonctions essentielles et nous avons attribué à chacune un ensemble de mécanismes pour rendre possibles ces mouvements.

Fonctions	Solutions possibles			
	1	2	3	4
Commander le fonctionnement				
	Commande manuelle	Commande vocale	Commande par Bluetooth	Ordinateur
Appareillage de mesure				
	Télémètre laser	comparateur	Pied à coulisse	Centimètre de mesure
Fixation				
	Aimant de fixation	Colle de fixation	crochets de fixation universels	vis à double filetage
Effectuer la translation de l'appareil				
	rails de guidage	Guidage linéaire aluminium	Tige de translation	Vérin à crémaillère

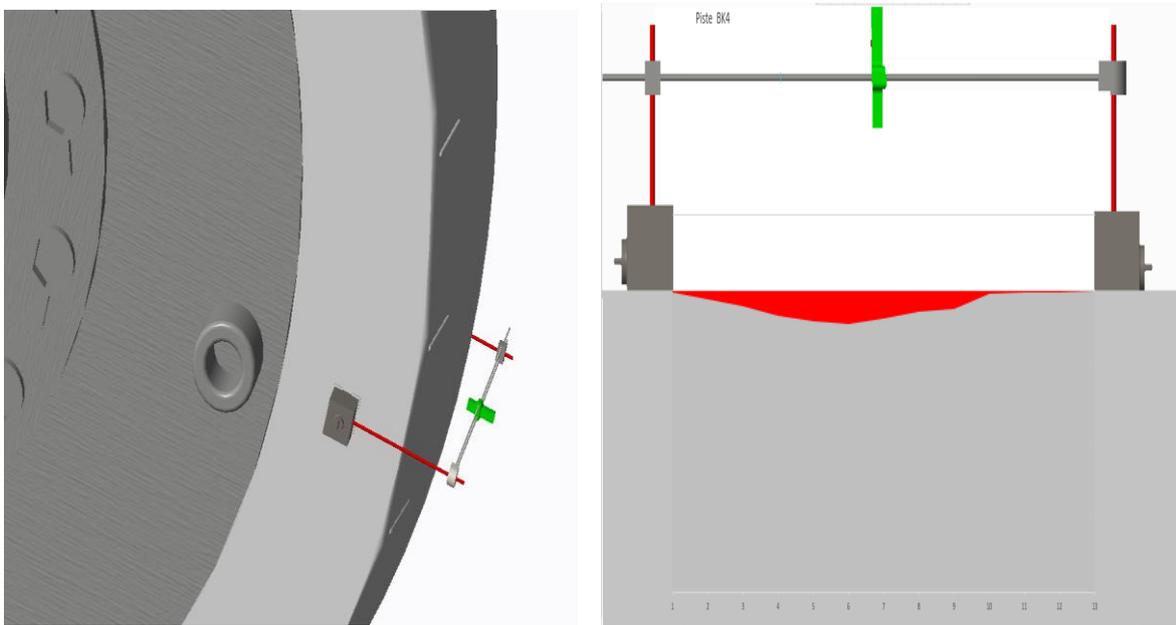
## 4.2 Prototypage

D'après les concepts ci-dessus nous avons proposé un prototype utilisé pour la mesure d'usure de la piste et du bandage galets, qui se décompose par une glissière qui facilite le guidage de télémètre laser et deux aimants qui permet la fixation du système.

Les figures ci-dessous montrent le système de mesure d'usure et ces différentes positions de montage



**FIGURE 18:PROTOTYPAGE NUMERIQUE SUR PTC CREO**



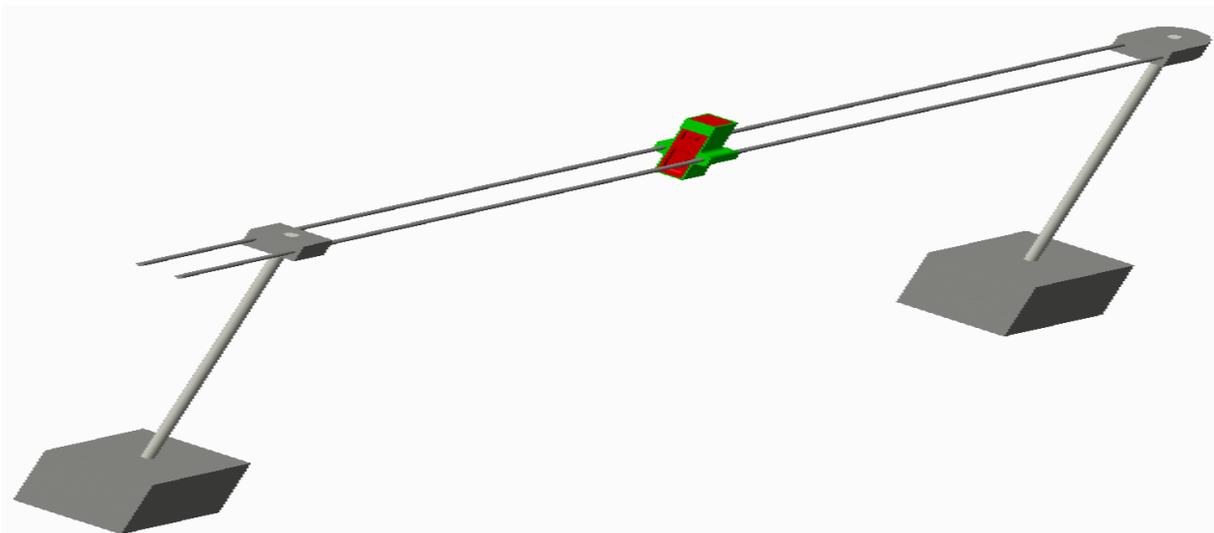
**FIGURE 19 : FIXATION DU SYSTEME SUR LE BANDAGE GALET ET LA PISTE**

**FIGURE 20:FIXATIONS REEL DU SYSTEME DE MESURE D'USURE**

## 5 . Dimensionnement du concept de mesure

### 5.1. Mise en situation

On va dimensionner le système de mesure d'usure de telle façon qu'il supporte l'appareil avec le boîtier, respecte les conditions de sécurité pour l'opérateur et résiste aux conditions du milieu extérieur.

**FIGURE 21:SYSTEME DE MESURE D'USURE**

## 5.2. Choix du matériau convenable

Ce problème que nous avons en cours de traiter il exige trois contraintes pour concevoir cette pièce pour lesquelles on a :

- Le poids minimum.
- La rigidité élevée.
- Coût minimale.

## 5.3. Choix basés sur le logiciel de CES

Pour effectuer le choix d'un matériau convenable à cette situation, nous procédons d'abord de trouver une nuance des matériaux qui respect les contraintes qu'on a (la rigidité, la légèreté, le cout mini), à l'aide de la méthode d'indice de performance.

Les indices de performances à maximiser sont les suivants :

- $IP = \frac{\sqrt{E}}{\rho}$  Pour minimiser la masse et maximiser la rigidité.
- $IP = \frac{\sqrt{E}}{C\rho}$  Pour avoir un coût minimal avec  $C\rho$  est le coût volumique.

On trace le module de Young  $E$  en fonction de  $\rho$  et  $C\rho$  dans le logiciel CES, et on trace la ligne de correspondance avec une pente de 0.5 et on le translate pour avoir le nuage des matériaux qui rependent aux indices de performances considérées. Les résultats obtenus sont représentés dans les figures suivantes :

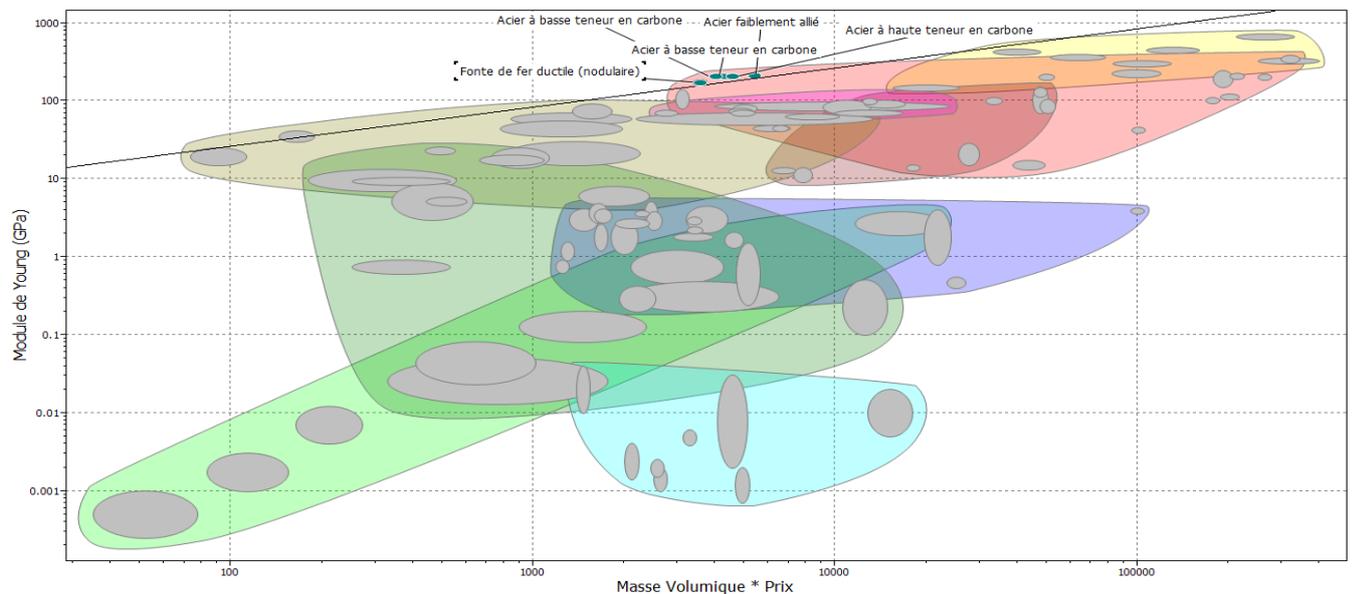


FIGURE 22:NUAGES DES MATERIAUX POUR  $I = \sqrt{E}/C\rho$

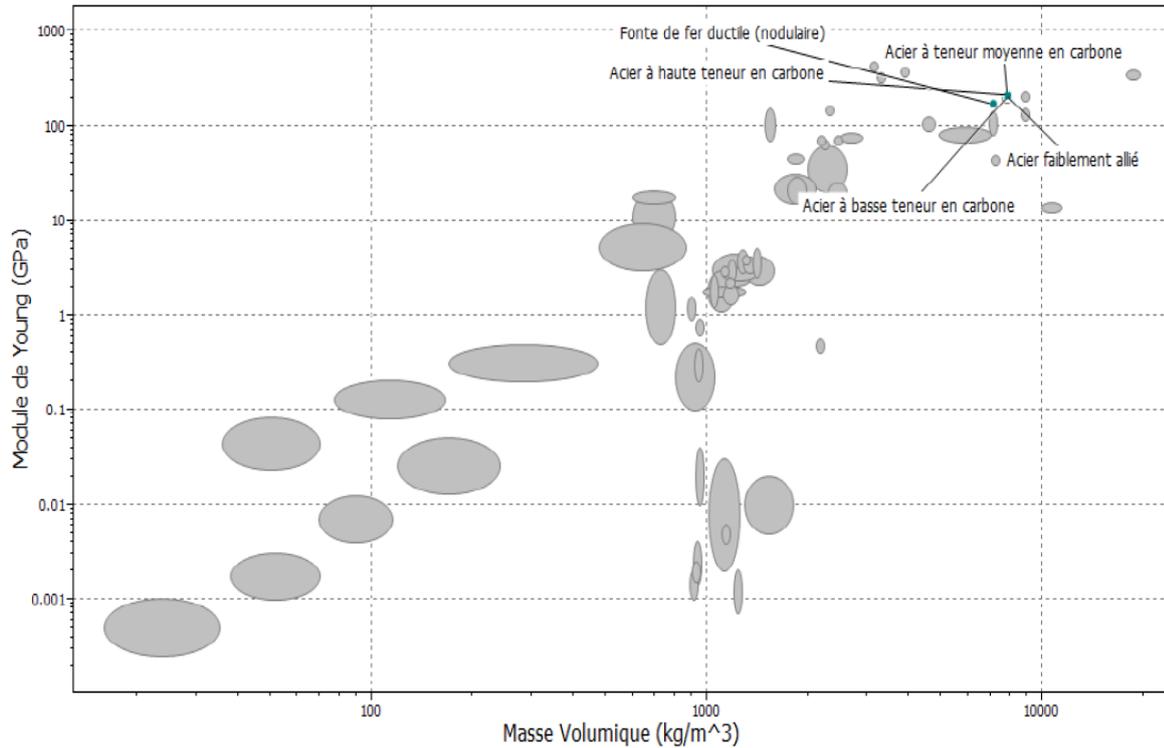


FIGURE 23 : NUAGES DES MATERIAUX POUR  $I = \sqrt{E/\rho}$

Les propriétés de ces matériaux sont données dans le tableau suivant :

Tableau 5:les propriétés des matériaux

Propriétés	Fonte Ductile	Acier à basse teneur C	Acier à haut teneur C	Acier faiblement allié	Acier à moyenne teneur C
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) - $\rho$	7100	7800	7800	7800	7800
Module d'élasticité (GPa)- E	180	210	215	217	216
Résistance ultime en tension (MPa)-Su	462	400	550	600	410
Limite d'écoulement (MPa) - Sy	331	250	400	500	305
Prix (€/kg)	0.47	0.49	0.557	0.655	0.518

**Conclusion :** d'après le tableau des propriétés, nous observons que la **Fonte ductile**, est un matériau qui présente une bonne caractéristique en termes de masse volumique et prix.

## 5.4. Démarche de l'analyse d'une structure :

Maintenant après avoir trouvé le matériau typique en termes de moindre coût, on passe maintenant à l'étude de la structure, et pour cela on va suivre la démarche suivante :

### a) Création du Modèle 3D :

La figure ci-dessous présente un concept qu'on va analyser à l'aide d'un logiciel de calcul de structure « Ansys Workbench».

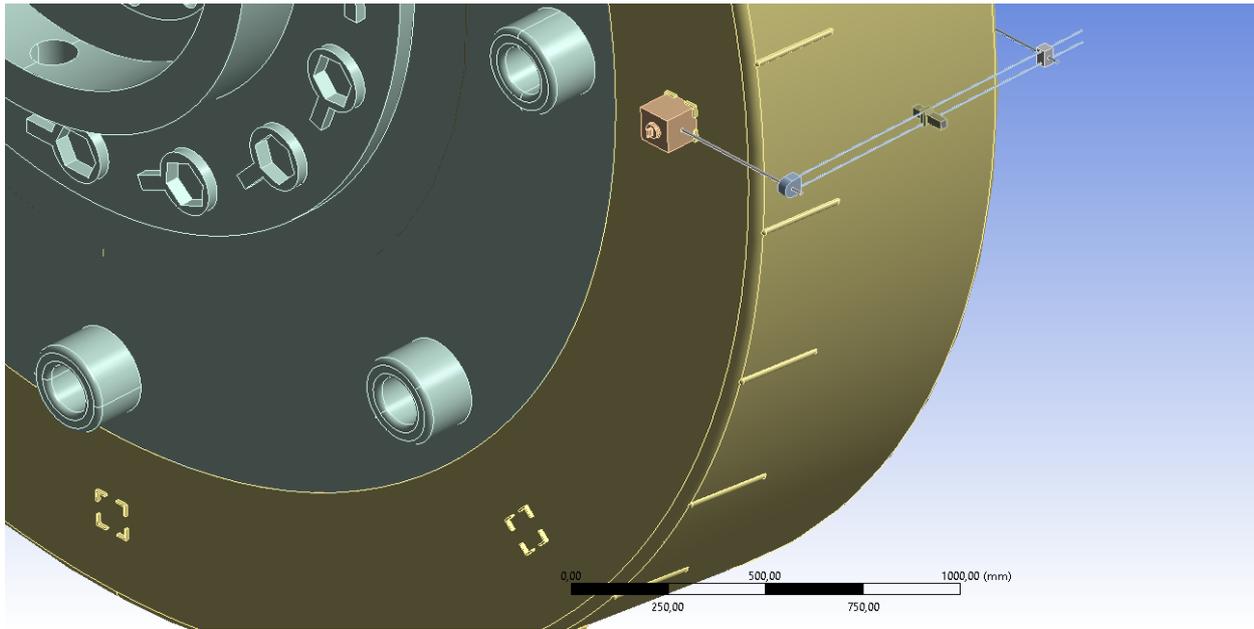


FIGURE 24: VUE ISOMETRIQUE DU SYSTEME SUR ANSYS

### b) Définition du matériau

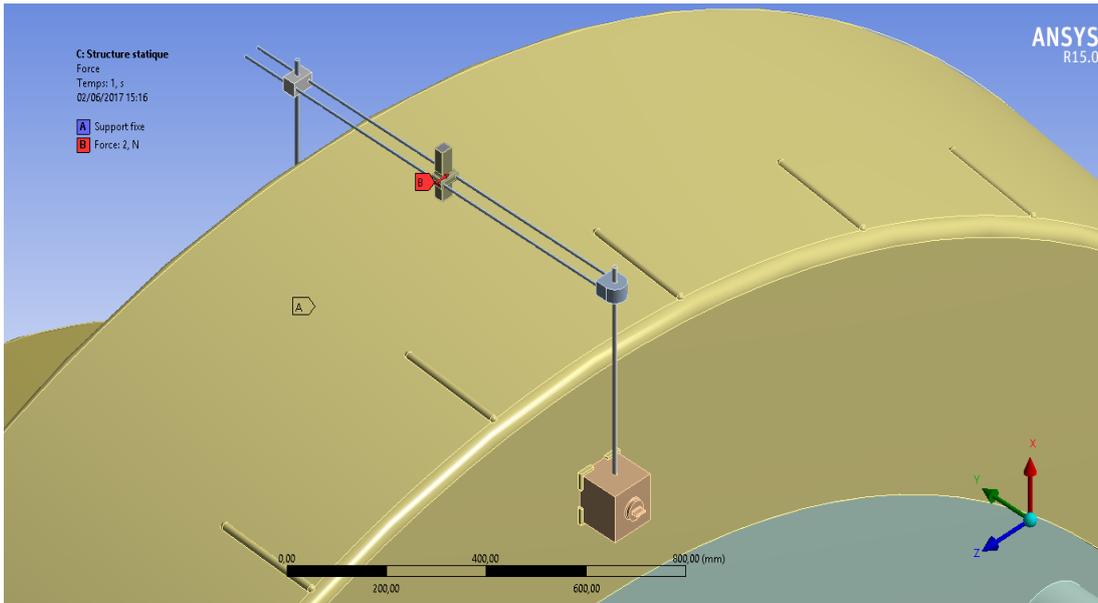
Le matériau utilisé pour le concept est la fonte ductile, Nous allons introduire le type de matériau dans le logiciel Ansys Workbench.

### c) Définition de l'environnement

Pour définir l'environnement, il faut introduire les conditions aux limites ainsi que les différentes sollicitations.

➤ Définition des conditions aux limites :

- On va fixer les deux extrémités de système de mesure d'usure.
- On va appliquer une force de 2N au centre du système.



**FIGURE 25: APPLICATION DES CONDITIONS AUX LIMITES**

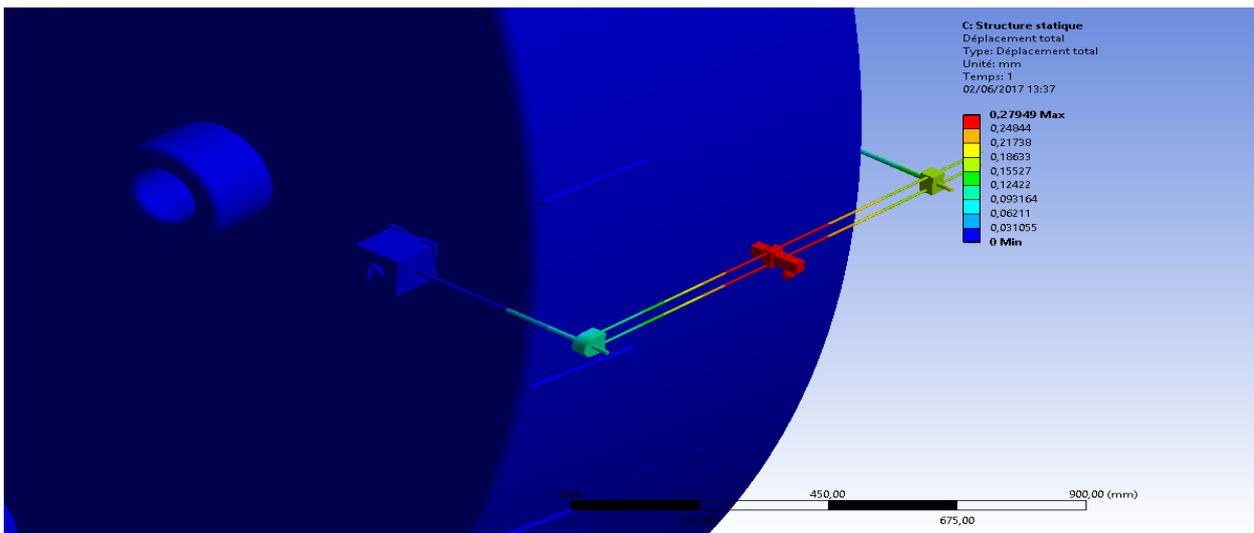
**d) Création du maillage :**

Cette étape est très importante pour savoir la répartition des contraintes au long du système ainsi que pour déterminer les zones à renforcer par la suite.

**e) Visualisation des résultats :**

Après avoir introduire tous les paramètres pour le logiciel Ansys, maintenant nous allons lancer les calculs.

Ansys a fourni les résultats suivants dans la figure ci-dessous :



**FIGURE 26 : VISUALISATION DES RESULTATS**

Le déplacement maximal qu'il peut atteindre la pièce est de l'ordre de 0,2 mm

## 5.5. Choix des aimants de fixation :

Dans cette partie on a cherché les différents aimants qui existent dans le marché et on a choisi un aimant METRICA avec réglage fin.

### Descriptif :

Socle magnétique, Filetage : M8 x 1,25, Force de maintien 800 N, Dimensions (L x l x H) 60 x 50 x 55 mm, Poids : 1,20 kg, Portée 4 Kg



## 6 La Méthodes d'utilisation de système de mesure d'usure

### 6.1.La sécurité

Avant la prise de mesure d'usure, une étape très importante au niveau de la sécurité des opérateurs et des équipements c'est la consignation qu'on doit faire pour chaque opération de mesure d'usure (voir annexe 2)



**FIGURE 27:CADENAS DE CONSIGNATION DU BROYEUR**

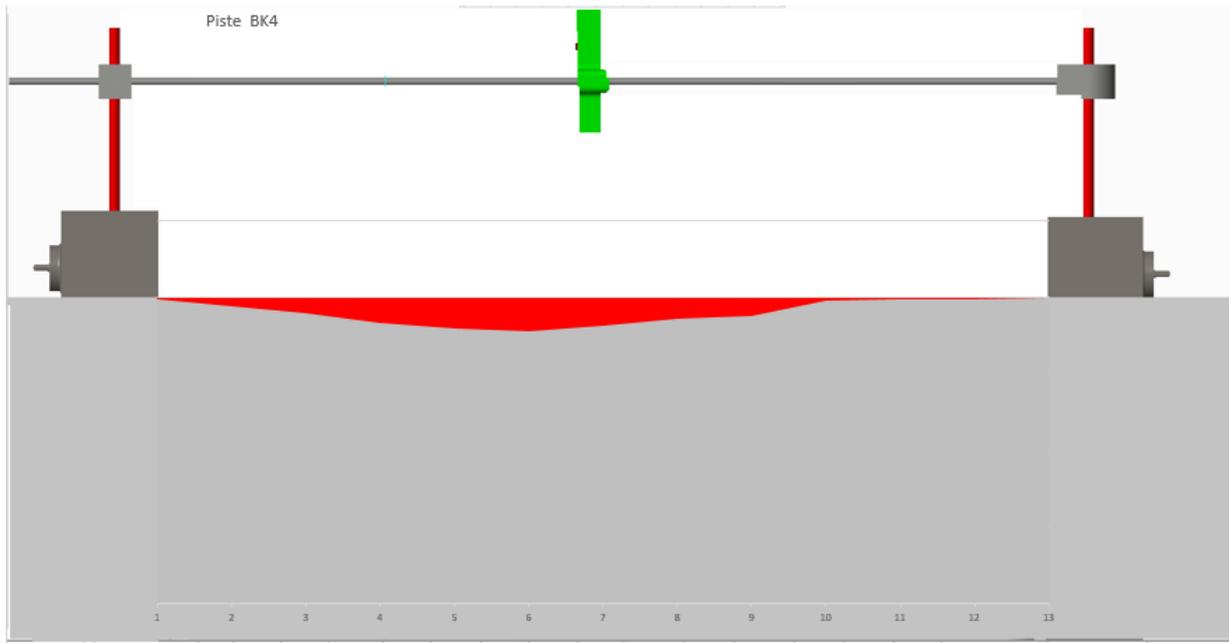
### 6.2. La Méthode de mesure d'usure des broyeurs ciment et cru

#### pour la piste :

Après l'étape de la sécurité qui se base sur la consignation des équipements. Nous devons :

- Attendre le refroidissement et nettoyer le broyeur (la piste).
- Fixer le concept de mesure d'usure.
- Utiliser un télémètre laser afin de mesurer l'usure de la piste.
- Enregistrer les résultats dans un tableau (voir l'annexe 1).

Au niveau de la piste nous avons tracé 4 repères pour faciliter la prise des mesures, pour chaque repère nous avons relevé 14 mesures avec des distances équidistantes.



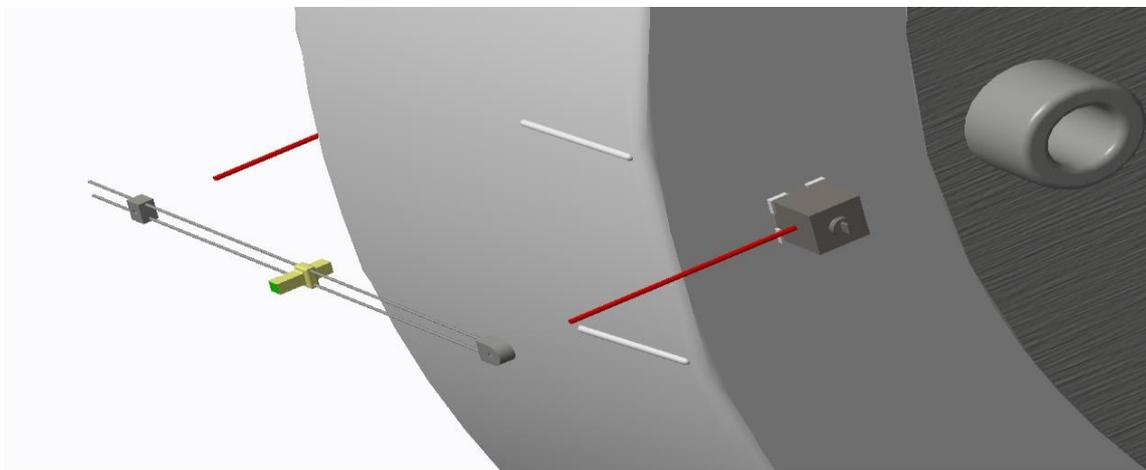
**FIGURE 28: FIXATION DE SYSTEME DE MESURE D'USURE POUR LA PISTE**

**✚ pour les galets :**

Après l'étape de la sécurité qui se base sur la consignation des équipements. Nous devons :

- Attendre le refroidissement et nettoyer le broyeur (les galets).
- Commencer de fixer le concept de mesure d'usure.
- Utiliser un télémètre laser pour mesurer l'usure.
- Enregistre les résultats dans un tableau (voir l'annexe 1)

Au niveau de ces galets nous avons tracé 3 repères positionné par un angle de  $120^\circ$  l'un par rapport à l'autre pour faciliter la prise des mesures, pour chaque repère nous avons relevé 14 mesures avec des distances équidistantes.



**FIGURE 29: MONTAGE DE LA GLISSIERE ET L'APPAREIL DE MESURE**

Chapitre 5 :

## Les Solutions proposées pour le problème d'usure

# Chapitre 5 : Solutions proposées pour le problème d'usure

## I. Introduction

Dans cette partie on va présenter la solution d'usure à court terme qui se base sur le changement de la piste, après nous allons présenter une deuxième solution à moyen terme concernant le fichier ECXEL de mesure d'usure, par la suite nous allons donner la méthodologie adaptée pour la mesure d'usure et la méthode de calcul de volume usé, Dans la fin de cette partie nous allons donner la solution long terme .

## II. Solution court terme (changement de la piste)

D'après les suivis d'usure et les contrôles programmés par les opérateurs, nous avons remarqué que la piste du Broyeur ciment atteint un niveau d'usure avancé pour lequel on ne peut pas recharger, car l'ancien rechargement est presque totalement arraché.

Pour cela nous avons fait une Planification du changement de la piste Broyeur ciment sur SAP dans laquelle nous avons identifié les pièces de rechange de la piste LOESCHE et lancé les demandes d'achat pour les pièces qui n'existent pas en stock, ensuite nous avons donné une proposition pour le démontage de la piste usée.

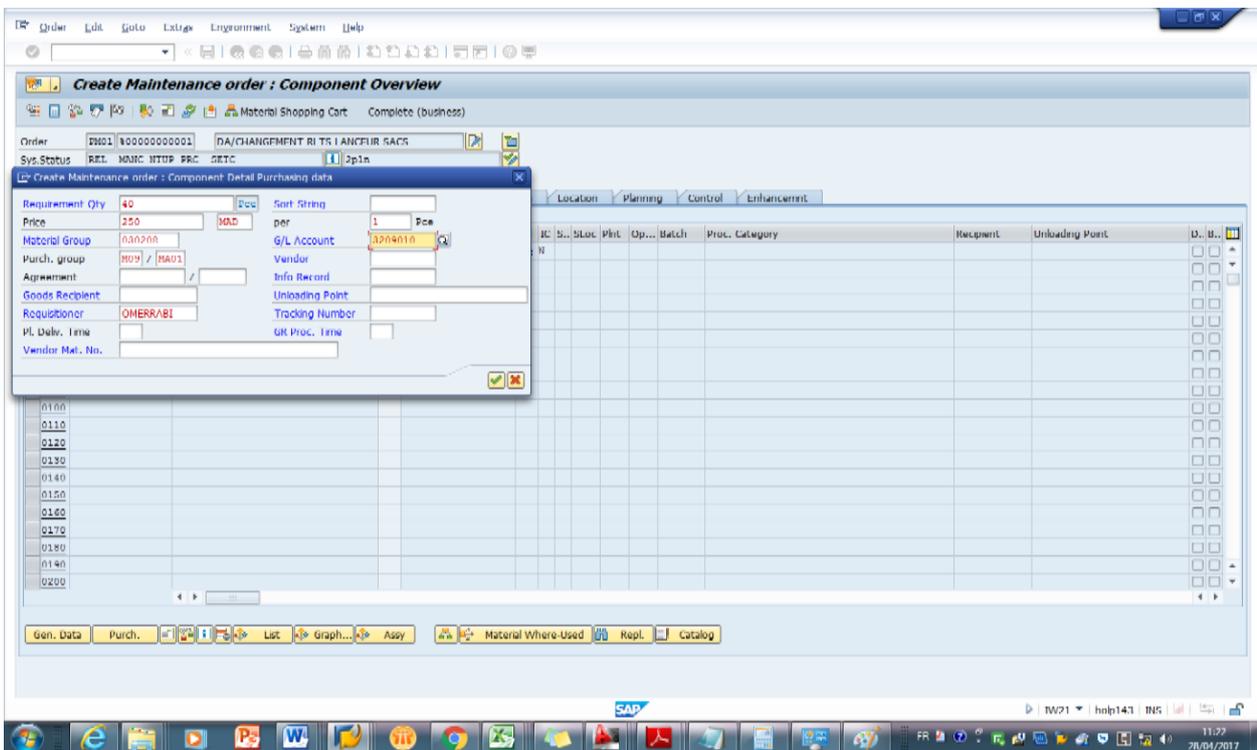


FIGURE 30 : PLANIFICATION DE CHANGEMENT DE PISTE SUR SAP

### III. Solution moyen terme (suivi d'usure)

#### 1. Mise en situation

L'analyse qu'on a effectuée sur le problème d'usure nous a amené à proposer une solution de mesure d'usure, dans le but de connaître quand on doit recharger la piste et les galets afin d'introduire le problème dans la politique de maintenance conditionnelle. Pour cela on a proposé d'élaborer une fiche de suivi qui comporte des indicateurs qui aide à la décision de planifier un rechargement pour le prochain arrêt ou de le retarder pour un autre arrêt, et pour la prise des mesures on va utiliser le dernier concept de mesure d'usure que nous avons proposé

#### 2. Méthodes de mesures d'usure pour les galets et la piste

##### 2.1.Introduction

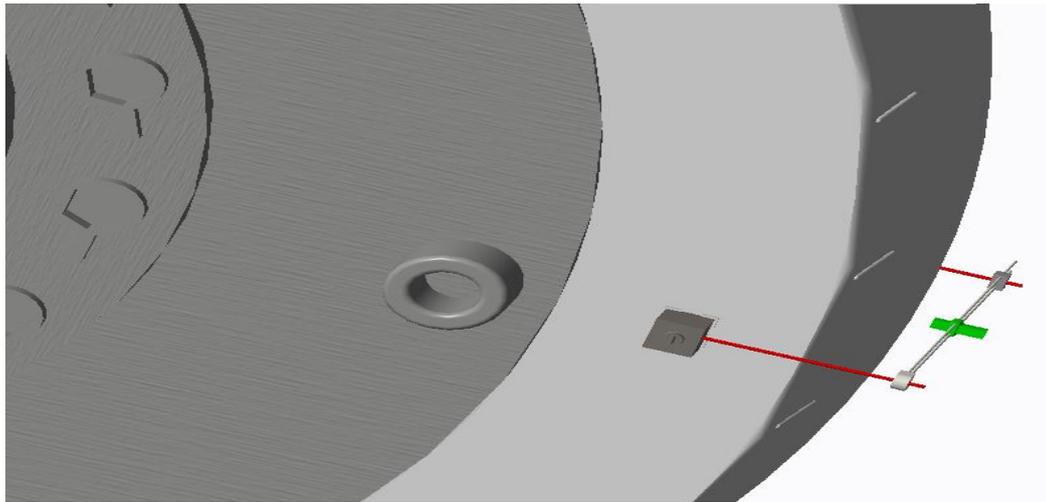
L'Objectif de cette méthode est de connaître le poids de métal dégradé pendant une durée de travail et un tournage connu afin d'adopter une vision claire sur l'évolution de l'usure en fonction de l'ensemble des paramètres du procès.

##### 2.2.Principe

Vu que les deux composantes étudiés (piste et galet) son atteignables c'est-à-dire qu'on peut les mesurer à chaque arrêt pour cela on a choisi de calculer la variation de volume après une période de travail connu, et sachant que les propriétés des matériaux des broyeurs sont connues aussi bien que les conditions de broyage de chaque matière ainsi on peut déterminer les différents indicateurs d'usure.

##### 2.3 Méthodologie

Après chaque rechargement ou changement de bandage galet, on prend des mesures de référence dans des repères numérisés (3 repères avec un angle de rotation entre deux repères successives est de  $120^\circ$  pour chaque galet et 4 repères avec un angle de rotation entre deux repères successives de  $90^\circ$  pour la piste) et pour un nombre de points équidistants (14 Points pour le système de mesure actuel).



➤ Après le broyage d'un tonnage P (qu'on va l'estimer après) le service de maintenance doit planifier un arrêt pour la prise des nouvelles mesures pour déterminer l'usure des galets et de piste.

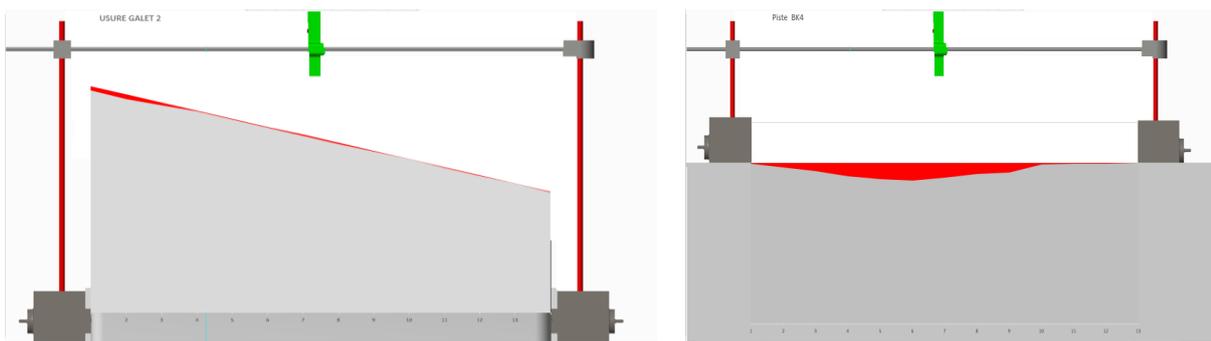


FIGURE 31 : PRISE DES NOUVELLES MESURES

➤ Les relevés de mesure vont être archivés dans un fichier Excel comme suit :

		ARCHIVE														
GALET 1	Date de mesure	Points de mesure N°														
	rep	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
rechargement																
	28/09/2015	1	40	25	18	10	7	4	5	4	5	5	8	8	7	5
		2	34	40	5	7	5	3	2	2	2	10	7	7	7	5
		3	35	30	5	4	4	3	2	2	3	10	7	7	6	5
	<b>MOYENNE</b>	<b>36,33</b>	<b>31,67</b>	<b>9,33</b>	<b>7,00</b>	<b>5,33</b>	<b>3,33</b>	<b>3,00</b>	<b>2,67</b>	<b>3,33</b>	<b>8,33</b>	<b>7,33</b>	<b>7,33</b>	<b>6,67</b>	<b>5,00</b>	
	02/09/2016	1	47	30	20	14	9	8	5	6	6	5	8	8	7	5
		2	66	50	40	24	21	9	5	4	4	10	9	8	8	5
		3	59	47	28	20	11	7	2	2	2	10	8	7	6	5
	<b>MOYENNE</b>	<b>57,33</b>	<b>42,33</b>	<b>29,33</b>	<b>19,33</b>	<b>13,67</b>	<b>8,00</b>	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>4,00</b>	<b>8,33</b>	<b>8,33</b>	<b>7,67</b>	<b>7,00</b>	<b>5,00</b>	
	<b>USURE PAR GALET</b>	<b>21,00</b>	<b>10,67</b>	<b>20,00</b>	<b>12,33</b>	<b>8,33</b>	<b>4,67</b>	<b>1,00</b>	<b>1,33</b>	<b>0,67</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>0,33</b>	<b>0,33</b>	<b>0,00</b>	

FIGURE 32:LE RELEVÉ DES MESURES POUR LE GALET

Finalement on calcule le volume usé et la masse du métal usée pour que le service de maintenance prenne une décision sur ce qu'il doit faire.

### 3. La méthode de calcul de volume usé

#### 3.1.Introduction

Dans cette partie on va élaborer les méthodes qu'on a utilisées pour le calcul du volume usé de métal pour les galets et la piste.

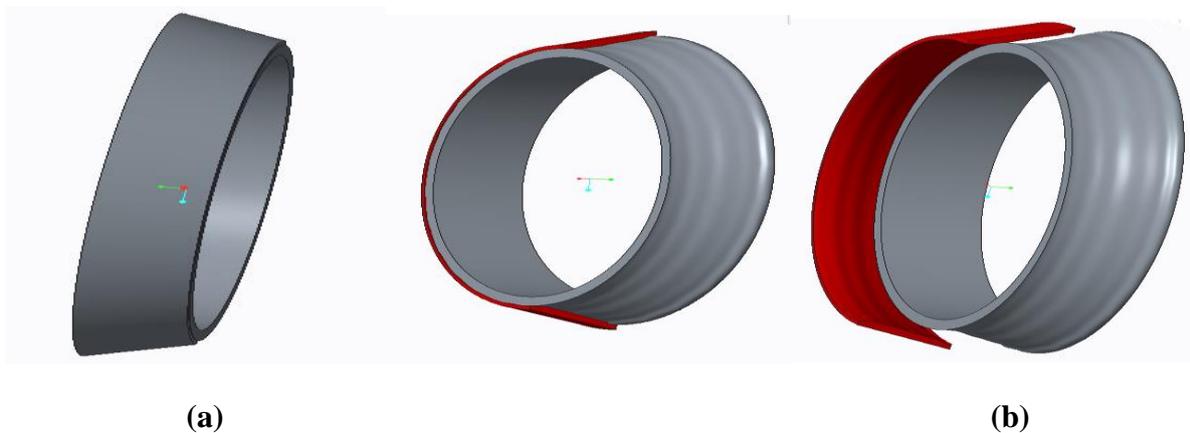
Au cours de fonctionnement normal de broyeur, les deux composantes qui intervenant dans le broyage de la matière (piste et galets) s'usent relativement à la quantité de matière broyée.

On définit le volume d'usure qui est la couche de métal enlevée au moment de broyage de la matière.

Le volume d'usure est le volume de matière disparu après rechargement des galets et de la piste.

Le volume d'usure est la différence entre le volume des composants (piste ou galet) en cas de rechargement et le volume des mêmes composants usés.

Les figures ci-dessous montrent Le volume du bandage galet avant et après rechargement :



**FIGURE 33: BANDAGE DE GALET AVANT(A) ET APRES(B) RECHARGEMENT**

#### 3.2.Hypothèse

Vu la forme de piste et des galets en plus des conditions d'utilisation et que les galets roulent sur la piste, on va adopter que l'usure est le même sur la surface frontale (la surface attaquée par l'usure), donc le volume usé est la révolution de la surface en rouge par rapport à l'axe du galet.



### 3.3.Cas d'application pour le Calcul de volume usé pour un galet

Pour calculer le volume usé nous avons proposé deux méthodes différentes, Simpson et trapèze.

$$\text{Volume d'usure} = 2 \cdot \pi \cdot \text{distance entre le centre de la surface d'usure et l'axe du galet} \cdot \text{surface d'usure}$$

Pour calculer ce volume nous avons utilisé les mesures du 02/09/2016, comme illustré à la figure ci-dessous :

	Date de mesure	rep	Points de mesure N°														Heures travaillées	Tonnage produit	Société	
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14				
<b>GALET 1</b>	rechargement/new bandage																			
	28/09/2015	1	40	25	18	10	7	4	5	4	5	5	8	8	7	5	POIS USES (KG)			
		2	34	40	5	7	5	3	2	2	2	10	7	7	7	5	180,119	191,32		
		3	35	30	5	4	4	3	2	2	3	10	7	7	6	5				
		MOYENNE	36,33	31,67	9,33	7,00	5,33	3,33	3,00	2,67	3,33	8,33	7,33	7,33	6,67	5,00	QenKG rechargée	Date de changement		
	02/09/2016	1	47	30	20	14	9	8	5	6	6	5	8	8	7	5				
		2	66	50	40	24	21	9	5	4	4	10	9	8	8	5				
		3	59	47	28	20	11	7	2	2	2	10	8	7	6	5				
		MOYENNE	57,33	42,33	29,33	19,33	13,67	8,00	4,00	4,00	4,00	8,33	8,33	7,67	7,00	5,00				
		USURE PAR GALET	21,00	10,67	20,00	12,33	8,33	4,67	1,00	1,33	0,67	0,00	1,00	0,33	0,33	0,00	MOYENNE	5,8333	mm	

➤ Après le calcul d'usure pour chaque point on va calculer l'intégrale de la surface usé par 2 méthodes : méthode Simpson et méthode de Trapèze.

➤ La course de l'appareil de mesure il subdivisée en sous- intervalles  $\{[x_{i-1}, x_i], i = 1, 2, \dots, 14;$

➤ La distance entre deux points X1 et X2 représente le Pas  $h = 50 \text{ mm}$  et l'usure par point  $X_i$  représente les images  $f(x_i)$  ; et on applique les deux méthodes de calcul.

### Méthode de Simpson

➤ La Formule de Simpson s'écrit sous la forme suivante :

$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{h}{3} * (f_0 + 4f_1 + 2f_2 + 4f_3 + \dots + 2f_{n-2} + 4f_{n-1} + f_n)$$

Donc :

$$\text{La surface usée} = \left(\frac{50}{3}\right) * (21,00 + 4 * 10,67 + 2 * 20 + 4 * 12,33 + 2 * 8,33 + 4 * 4,67 + 2 * 1 + 4 * 1,33 + 2 * 0,67 + 4 * 0 + 2 + 4 * 0,33 + 2 * 0,33 + 0) * 10^{-6} = 0,00335 \text{ m}^2$$

➤ Ainsi nous avons multiplié par  $2 \pi * \text{rayon}$  ou bien  $\pi * D\text{-moyen}$  :

Donc :

$$\text{Le Volume usé} = 0,00335 * PI () * (2200 - 5,8333) * 10^{-3} = 0,023092146 m^3$$

### ➤ Calcul de masse usée

On sait que Le matériau utilisé pour le bandage galet et la piste, c'est NI-HARDE 4, ainsi que la masse volumique de ce type de matériau :  $\rho = 7800 \text{ Kg /m}^3$ .

Alors on peut calculer la masse usé qui est le volume multiplié par la masse volumique :

$$\text{La masse usée} = \rho * \text{volume usé}$$

$$\text{La masse usée} = 0,023092146 * 7800 = 180,118738 \text{ kg}$$

### Méthode de trapèze

✚ La Formule de trapèze s'écrit sous la forme suivante :

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{2} * (f_0 + 2f_1 + 2f_2 + \dots + 2f_{n-1} + f_n)$$

Donc :

$$\text{La surface usée} = \left(\frac{50}{2}\right) * (21,0 + 2 * 10,67 + 2 * 20 + 2 * 12,33 + 2 * 8,33 + 2 * 4,67 + 2 + 2 * 1,33 + 2 * 0,67 + 2 + 2 + 2 * 0,3 + 2 * 0,3 + 0) * 10^{-6} = 0,003558333 m^2$$

✚ Ainsi on va multiplier par  $2 \pi * \text{rayon}$  ou bien  $\pi * D\text{-moyen}$ .

$$\text{Le Volume usé} = 0,00335 * PI () * (2200 - 5,8333) * 10^{-3} = 0,024528225 m^3$$

### ➤ Calcul de masse usée

On sait que Le matériau utilisé pour le bandage galet et la piste, c'est NI HARDE 4, ainsi que la masse volumique de ce type de matériau :  $\rho = 7800 \text{ Kg /m}^3$ .

Alors on peut calculer la masse usée qui est le volume multiplié par la masse volumique

$$\text{La masse usée} = \rho * \text{volume usé}$$

$$\text{La masse usée} = 0,024528225 * 7800 = 191,32 \text{ kg}$$

## 4. Rechargement des galets et de Piste pour le Broyeur ciment BK4

Les objectifs d'opération du rechargement sont:

- Amélioration de la consommation spécifique électrique du broyeur.
- Amélioration de l'efficacité du broyage (augmentation du débit broyeur).
- Optimisation des coûts de maintenance par protection des pièces d'usure.

La piste et les galets peuvent être remis en état de manière peu coûteuse et en bonne qualité, comme illustrent les figures suivantes :



(GALET AVANT RECHARGEMENT)

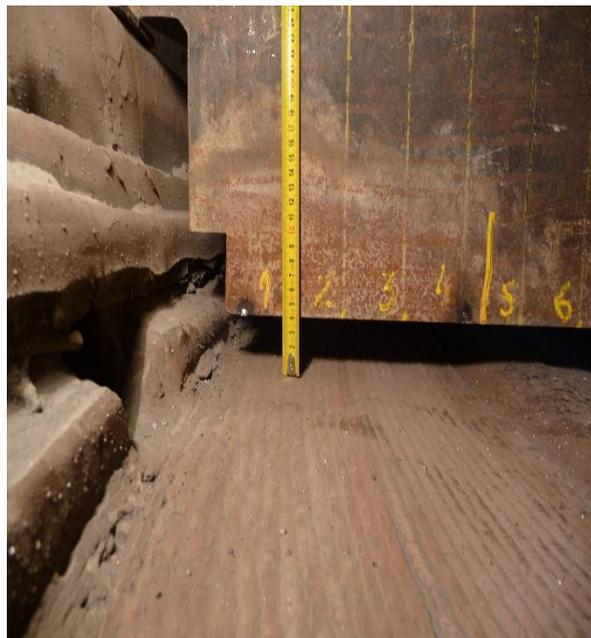


(GALET APRES RECHARGEMENT)

**FIGURE 34: RECHARGEMENT DE GALET DU BROYEUR BK4**



(PISTE AVANT RECHARGEMENT)



(PISTE APRES RECHARGEMENT)

**FIGURE 35: RECHARGEMENT DE PISTE DU BROYEUR BK4**

## IV. Solution long terme (nouvelle conception)

### Introduction :

Dans cette partie on va étudier la solution à long terme, c'est la proposition d'apporter des modifications dans le concept de broyage LOESCHE.

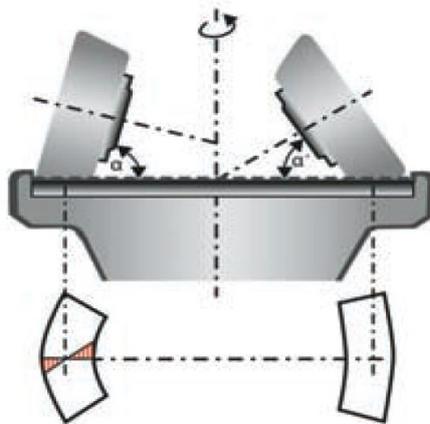
### 1. Présentation du principe de broyage LOESCHE

La technologie de broyage LOESCHE permet de choisir entre divers mécanisme de broyage s'étendant des combinaisons de compression et cisaillement jusqu'à l'écrasement par une seule compression.

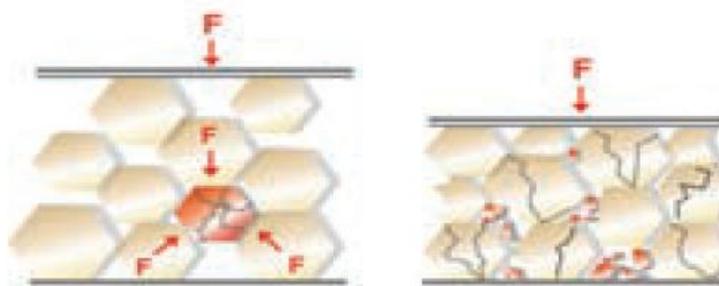
Dans le broyeur LOESCHE la matière à broyer est écrasée entre le plateau de broyage horizontal effectuant un mouvement de rotation, et les moules à emplacements fixes.

Tandis que les axes de rotation des moules coupent toujours l'axe de rotation du plateau de broyage, suivant l'emplacement des points d'intersection on distingue deux types de broyage :

- Un broyage uniquement par compression quand ces points d'intersection appartenant à la surface de contact entre les moules et le lit de broyage.
- Un broyage par compression et cisaillement quand ces points d'intersection soit en dehors de ce plan.



Les caractéristiques du minerai à traiter imposent le principe de broyage afin d'obtenir un degré de libération optimal, plus le degré de libération dans les minerais broyer est élevé plus la probabilité d'un bon rendement est haut.



En général les broyeurs LOESCHE fonctionnent d'après le principe de broyage par compression et cisaillement partiel ce principe est réalisé moyennant des moules coniques à 30 degré d'ouverture et dont les axes sont inclinés à 15 degré par rapport au plan.

## 2. Étude statique des deux systèmes piste et bandages galets

### 2.1. Les Données du problème

✚ Données géométriques du bandage galets :

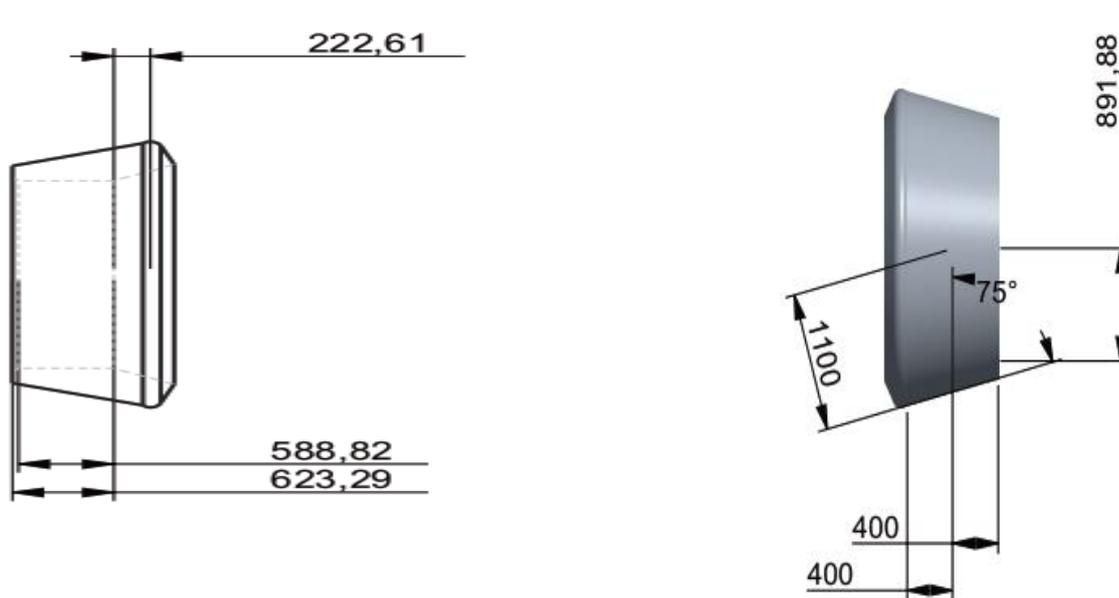


FIGURE 36 : DONNEES GEOMETRIQUES DU GALET

✚ Données géométriques de la piste :

La piste du broyeur est composée de 12 morceaux égaux.

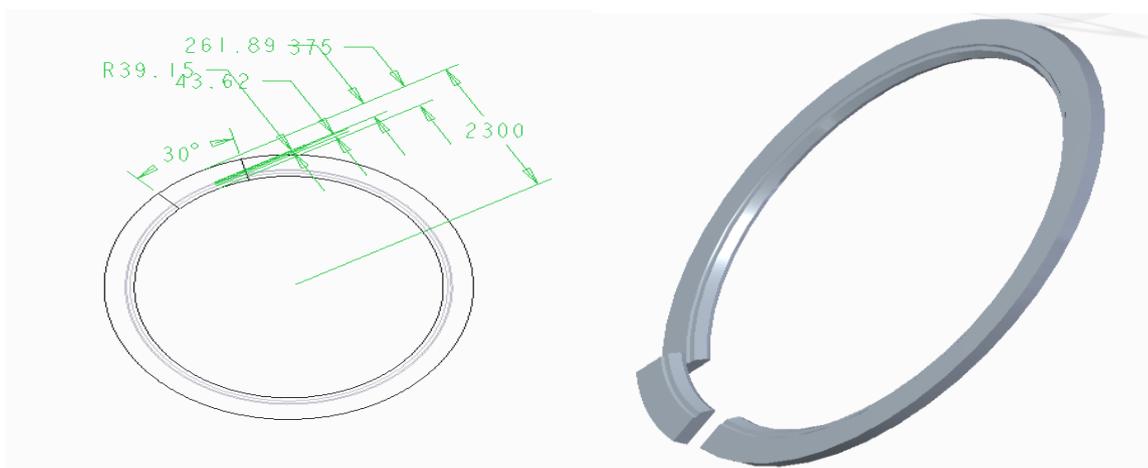


FIGURE 37 : DONNEES GEOMETRIQUES DE LA PISTE

**Donnés des matériaux :**

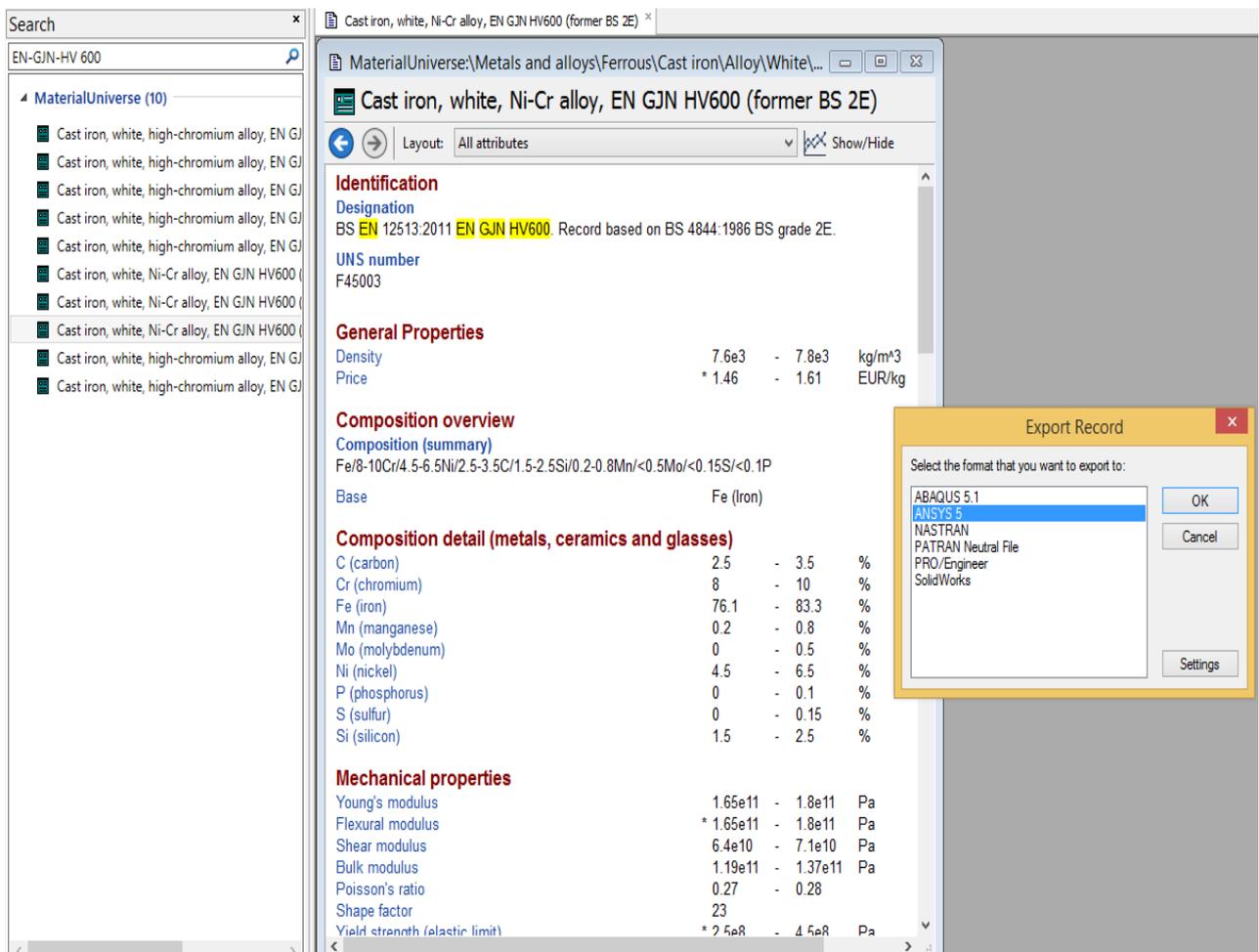
Les fontes ni-hard sont des fontes dont la structure est martensitique ce qui leur confère une grande résistance à l'usure, à température élevée.

**Table 6 : composition chimique de Ni Hard**

**NI Hard (Résistant à l'usure)**

Dénomination	Composition chimique basique								Propriétés
	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Mo	
NI -HARD 1	3-3,6	0,3-0,5	0,3-0,7	MAX0,15	MAX0,3	3,3-4,8	1,5-2,6	MAX0,4	53-61 RC
NI -HARD 2	MAX2,9	0,3-0,5	0,3-0,7	MAX0,15	MAX0,3	3,3-5	1,4-2,4	MAX0,4	52-59 RC
NI -HARD 3	1-1,6	0,4-0,7	0,4-0,7	MAX0,05	MAX0,05	4-4,75	1,4-1,8		
NI -HARD 4	2,6-3,2	1,8-2	0,4-0,6	MAX0,1	MAX0,06	5-6,5	8-9	MAX0,4	MAX0,4

Ni hard 4 le matériau qui fut le plus utilisé pour la confection des pièces d'usure ses propriétés sont proches des fontes, une recherche sur internet a donné la désignation du matériau EN-GJN-HV 600, ainsi on a cherché ce matériau sur CES EduPack 2013



The screenshot shows the CES EduPack 2013 interface. The main window displays the material 'Cast iron, white, Ni-Cr alloy, EN GJN HV600 (former BS 2E)'. The 'Identification' section shows the designation 'BS EN 12513:2011 EN GJN HV600' and the UNS number 'F45003'. The 'General Properties' section lists Density (7.6e3 - 7.8e3 kg/m³) and Price (\* 1.46 - 1.61 EUR/kg). The 'Composition overview' section shows the chemical composition: Fe/8-10Cr/4.5-6.5Ni/2.5-3.5C/1.5-2.5Si/0.2-0.8Mn/<0.5Mo/<0.15S/<0.1P. The 'Composition detail (metals, ceramics and glasses)' section lists the elemental composition: C (carbon) 2.5 - 3.5 %, Cr (chromium) 8 - 10 %, Fe (iron) 76.1 - 83.3 %, Mn (manganese) 0.2 - 0.8 %, Mo (molybdenum) 0 - 0.5 %, Ni (nickel) 4.5 - 6.5 %, P (phosphorus) 0 - 0.1 %, S (sulfur) 0 - 0.15 %, Si (silicon) 1.5 - 2.5 %. The 'Mechanical properties' section lists Young's modulus (1.65e11 - 1.8e11 Pa), Flexural modulus (\* 1.65e11 - 1.8e11 Pa), Shear modulus (6.4e10 - 7.1e10 Pa), Bulk modulus (1.19e11 - 1.37e11 Pa), Poisson's ratio (0.27 - 0.28), Shape factor (23), and Yield strength (plastic limit) (\* 2.5e8 - 4.5e8 Pa). An 'Export Record' dialog box is open, showing the format 'ANSYS 5' selected for export.

**FIGURE 38 : CHOIX DE MATERIAU PAR CES**

Ensuite nous exportons le matériau vers Ansys Workbench afin de réaliser des études simulation :

Propriétés de Ligne d'arborescence 7 : NI Hard 4				
	A	B	C	D E
1	Propriété	Valeur	Unité	
2	Masse volumique	7800	kg m <sup>-3</sup>	
3	Coefficient isotrope sécant de dilatation thermique			
4	Coefficient de dilatation thermique	1E-05	C <sup>-1</sup>	
5	Température de référence	298	K	
6	Elasticité isotrope			
7	Dériver de	Module de You...		
8	Module de Young	1,9E+11	Pa	
9	Coefficient de Poisson	0,275		
10	Module de compressibilité	1,4074E+11	Pa	
11	Module de cisaillement	7,451E+10	Pa	
12	Limite d'élasticité en traction	300	MPa	
13	Limite d'élasticité en compression	450	MPa	
14	Limite à la rupture en traction	420	MPa	
15	Limite à la rupture en compression	700	MPa	

FIGURE 39 : LES PROPRIETES DU MATERIAU

## 2.2. Les hypothèses et les résultats anticipés

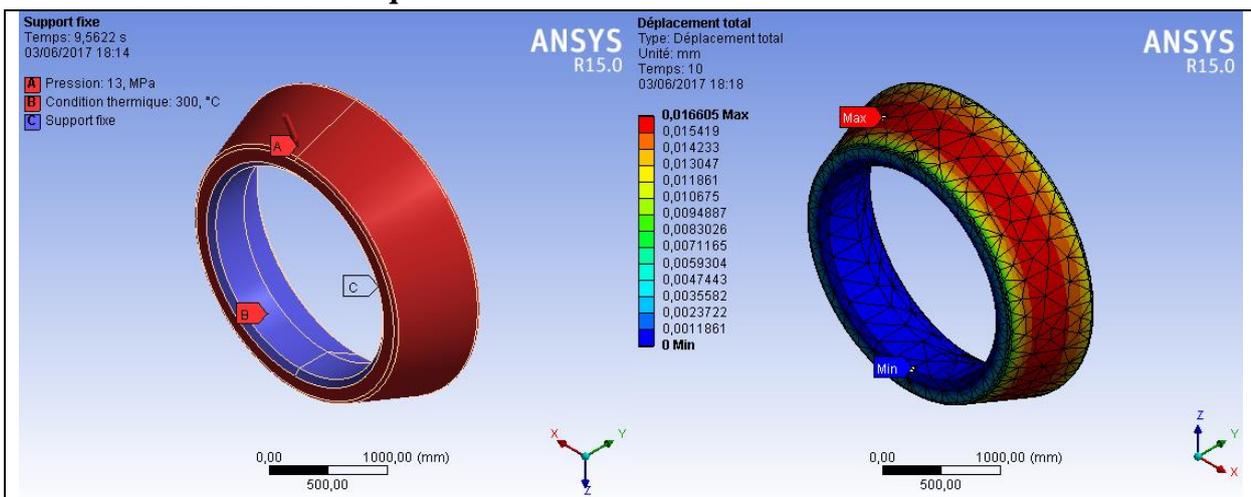
### Les hypothèses :

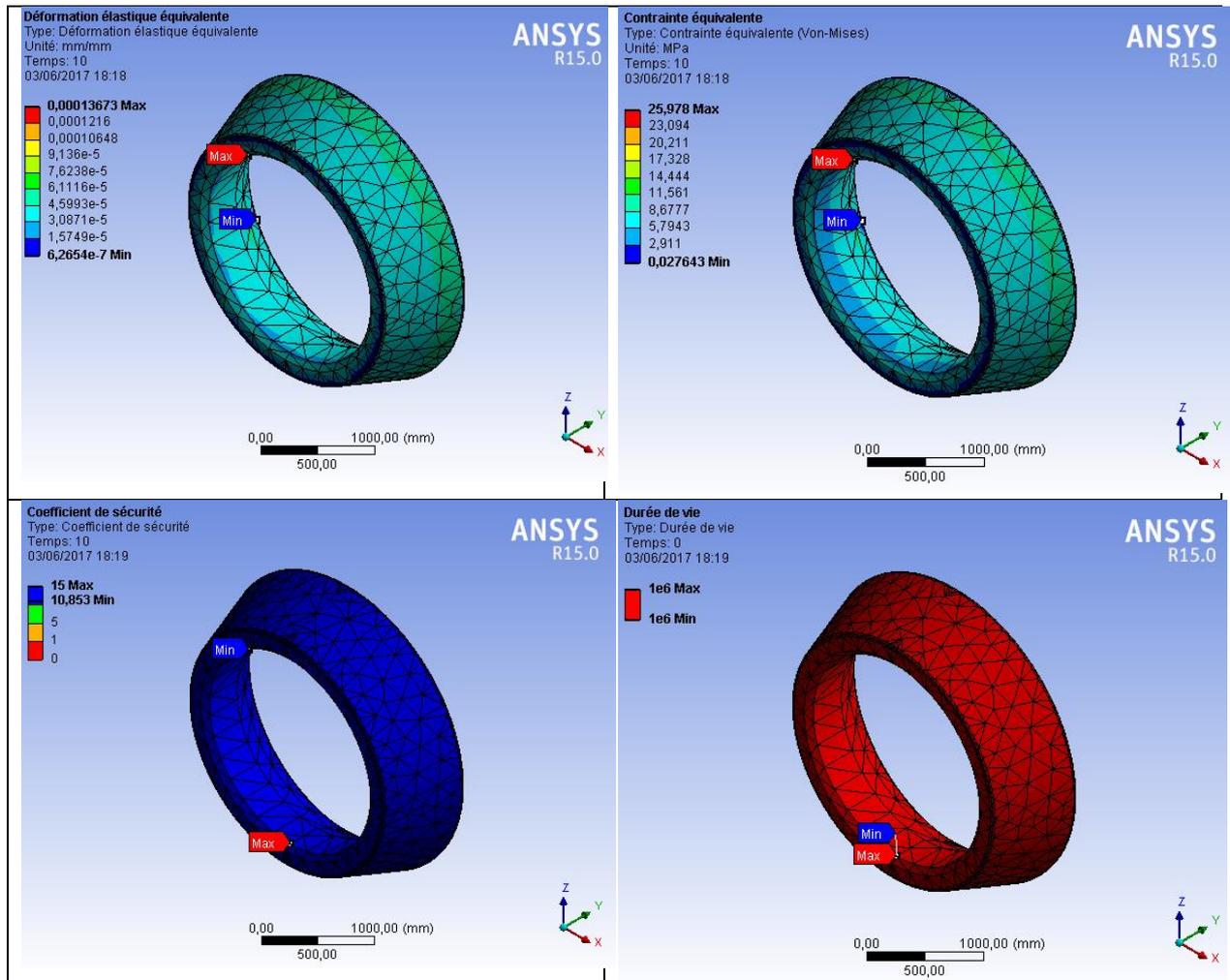
- On néglige la force appliquée par le poids du ciment.
- On néglige la force de gravité.

### Les conditions aux limites :

- On la pression du broyage du clinker 13 MPA.
- la température à l'intérieur de broyeur cru = 573 k BK4 = 363 k.

### Les résultats numériques :



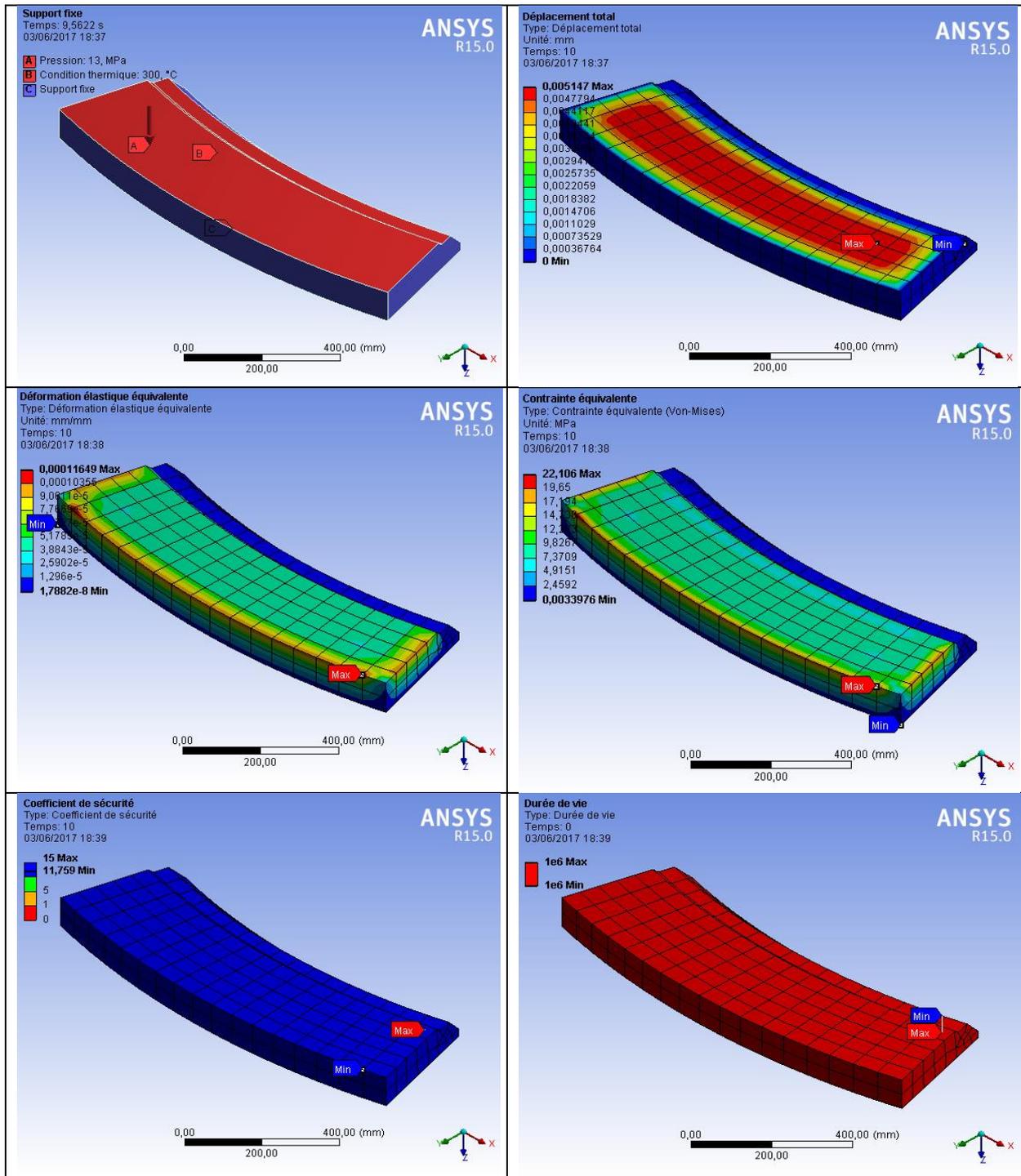


Nom de l'objet	Déplacement total	Déformation élastique équivalente	Contrainte équivalente
<b>Résultats</b>			
Minimum	0, mm	6,2654e-007 mm/mm	2,7643e-002 MPa
Maximum	1,6605e-002 mm	1,3673e-004 mm/mm	25,978 MPa
<b>Valeur minimale dans le temps</b>			
Minimum	0, mm	6,2654e-007 mm/mm	2,7643e-002 MPa
Maximum	0, mm	6,2654e-007 mm/mm	2,7643e-002 MPa
<b>Valeur maximale dans le temps</b>			
Minimum	1,6605e-002 mm	1,3673e-004 mm/mm	25,978 MPa
Maximum	1,6605e-002 mm	1,3673e-004 mm/mm	25,978 MPa

**FIGURE 40 : LES RESULTATS NUMERIQUES POUR LE GALET**

Le facteur de sécurité est calculé suivant la théorie de Mohr-Coulomb, on obtient un facteur de sécurité très élevé supérieur à 10.

Dans les mêmes conditions aux limites on prélève les résultats numériques pour un morceau de la piste.



Nom de l'objet	Déplacement total	Déformation élastique équivalente	Contrainte équivalente
<b>Résultats</b>			
Minimum	0, mm	1,7882e-008 mm/mm	3,3976e-003 MPa
Maximum	5,147e-003 mm	1,1649e-004 mm/mm	22,106 MPa
<b>Valeur minimale dans le temps</b>			
Minimum	0, mm	1,7882e-008 mm/mm	3,3976e-003 MPa
Maximum	0, mm	1,7882e-008 mm/mm	3,3976e-003 MPa
<b>Valeur maximale dans le temps</b>			
Minimum	5,147e-003 mm	1,1649e-004 mm/mm	22,106 MPa
Maximum	5,147e-003 mm	1,1649e-004 mm/mm	22,106 MPa

FIGURE 41 : RESULTATS NUMERIQUES POUR LA PISTE

De même on a un facteur de sécurité très important  $FS=11,759$ , ainsi on remarque que le matériau Ni Hard 4 n'a aucun problème de contrainte et présente un bon facteur de sécurité, pour cela on va choisir les matériaux qui sont relativement dur par rapport au Ni hard 4.

### 3. Choix du matériau

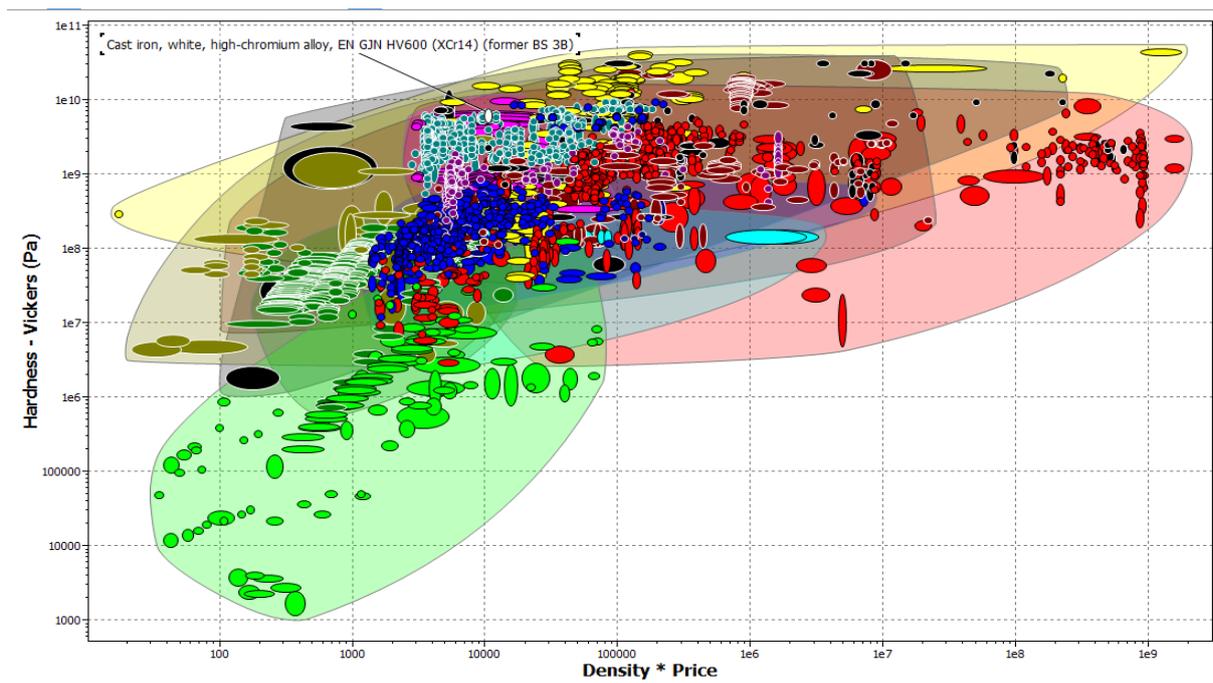
Le choix de matériaux est basé sur les contraintes suivantes :

- **dureté élevée.**
- **température de service élevée.**
- **coût minimum.**
- **rigidité élevée.**

Pour choisir un matériau qui répond à toutes ces contraintes on va utiliser le logiciel de choix de matériaux CSE EduPack 2013 LEVEL 3.

✚ Le premier stage :

Premièrement on va traiter les deux contraintes prix et dureté, pour cela on va identifier le matériau Ni Hard 4 et choisir les matériaux qui ont une dureté plus grande et un coût acceptable.



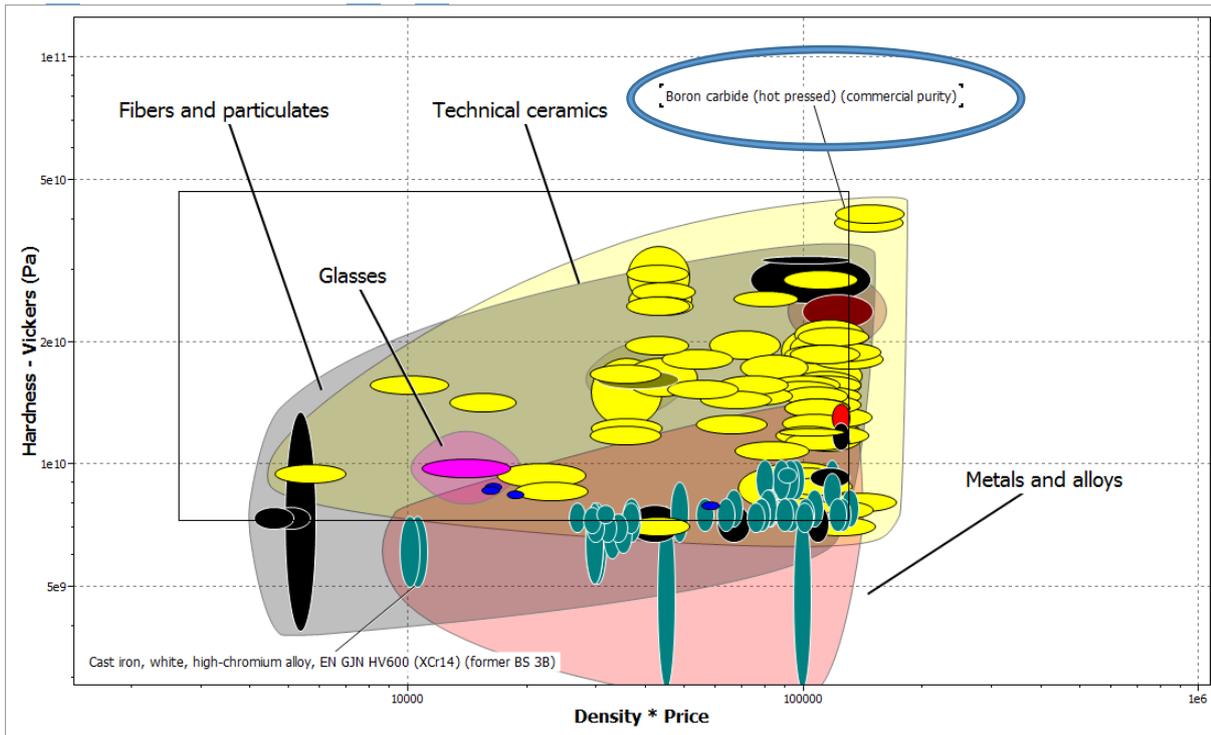


FIGURE 42 : LE CHOIX DE MATERIAU PAR CES (STAGE 1)

Ce stage nous a permis de choisir le matériau le plus dur qui est le Carbure de bore (pressée à chaud) (pureté commerciale)



**Le carbure de bore (B4C)** est une céramique très dure et très résistante aux hautes températures.

#### Usages

Cette céramique est utilisée dans de nombreuses applications industrielles, et pour divers usages militaires, dont des blindages.

✚ Stage II :

Pour le deuxième stage on a choisi les matériaux qui se comportent bien pour la **température élevée** et qui ont un module de compressibilité élevé.

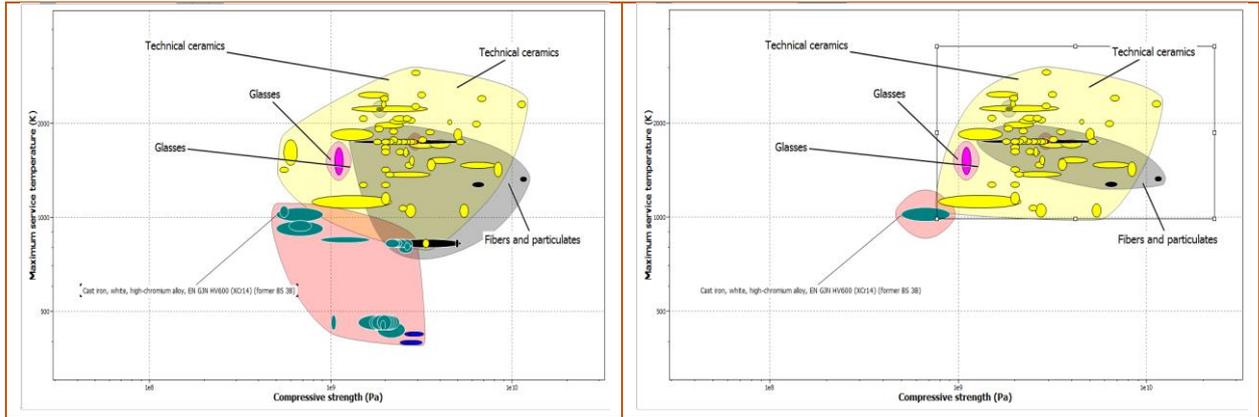


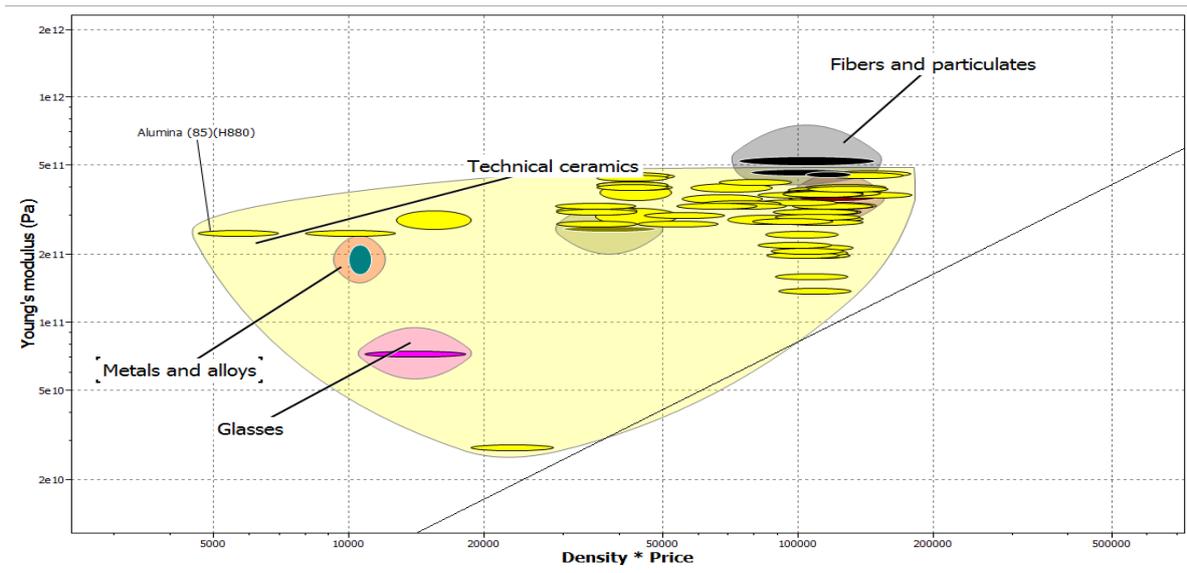
FIGURE 43 : CHOIX DE MATERIAU PAR CES (STAGE 2)

Stage III :

Pour le troisième stage l'astuce était de choisir le matériau qui a l'indice de performance à maximiser :

$$IP = \frac{\sqrt{E}}{C\rho}$$

Pour avoir un coût minimal avec  $C\rho$  est le coût volumique



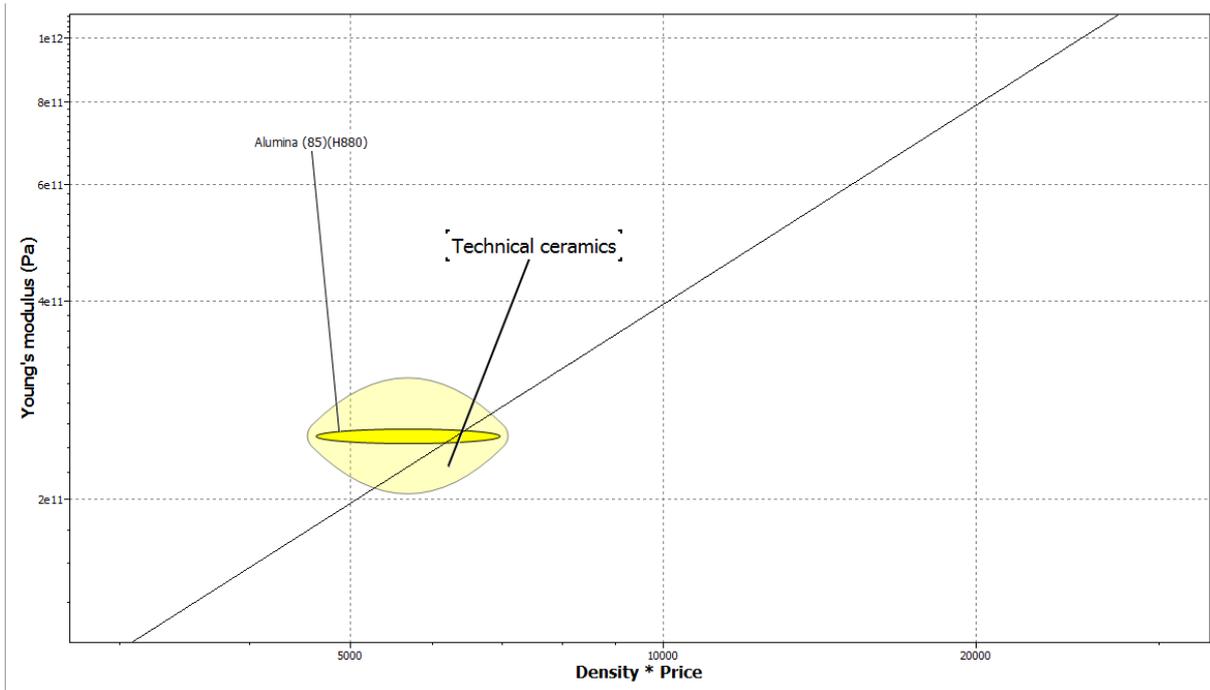


FIGURE 44 : CHOIX DE MATERIAU PAR CES (STAGE 3)

Le raisonnement qui précède montre que **l'alumine** est le matériau le plus adapté pour ces conditions, postulat qu'on va vérifier avec des simulations.



### L'alumine

ou oxyde d'aluminium, de formule chimique  $Al_2O_3$ , est un composé chimique qui existe à l'état naturel dans la bauxite, sous forme d'alumine hydratée mélangée avec de l'oxyde de fer.

### 3.1. Analyse des nouveaux matériaux

De la même manière on va apporter les matériaux quand on a choisis à l'aide de l'outil informatique CES.

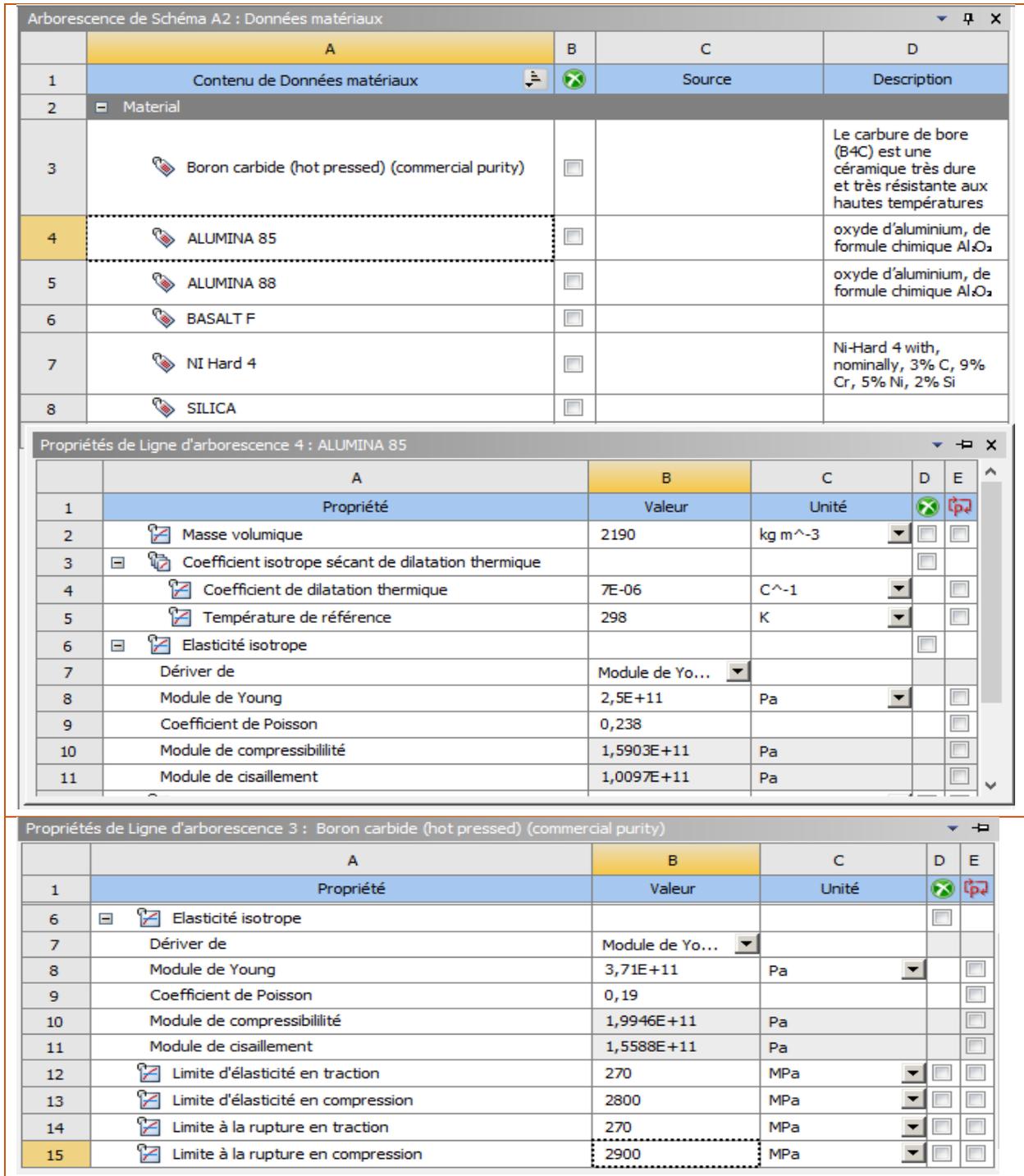
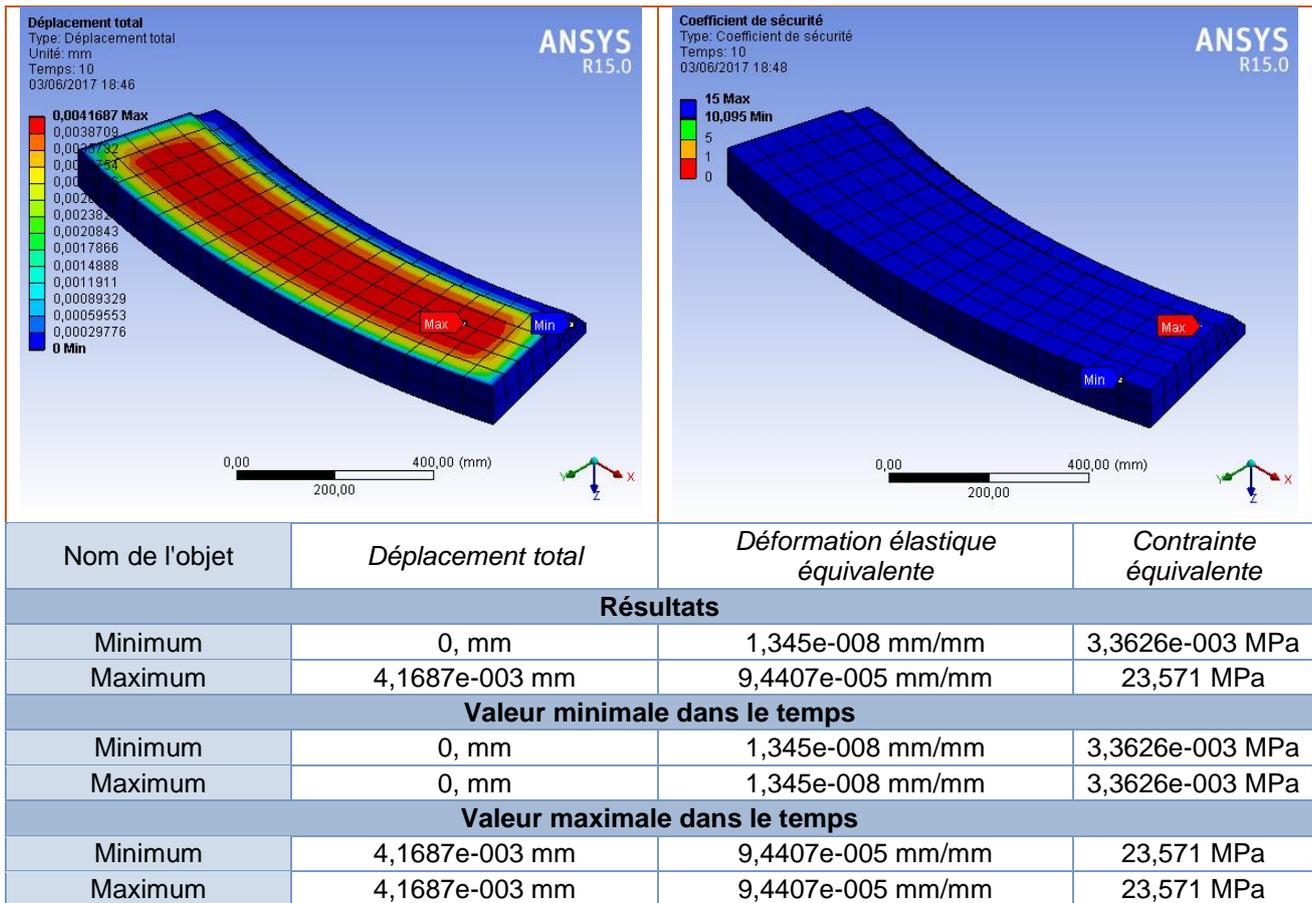


FIGURE 45 : LES PROPRIETES DES MATERIAUX

Pour les mêmes conditions de chargement on a les résultats numériques suivant :



**FIGURE 46 : NOUVELLE RESULTAT**

Ainsi l'alumine présente un bon facteur de sécurité et des déplacements total inférieur à celle du matériau Ni Hard 4 en plus l'alumine est plus dure que le Ni Hard 4, cause pour laquelle en conseil la société de lancer un appel d'offre aux sociétés qui peut construire la piste de ce matériau.

Pour le bandage cette modification n'est pas conseillée, car le bandage subit des anomalies autres que l'usure exemple des arrachements et des fissures qui peuvent mettre fin à la durée de vie de ce composant, et nous n'avons aucune information pour le comportement de ce matériau avec la fatigue.

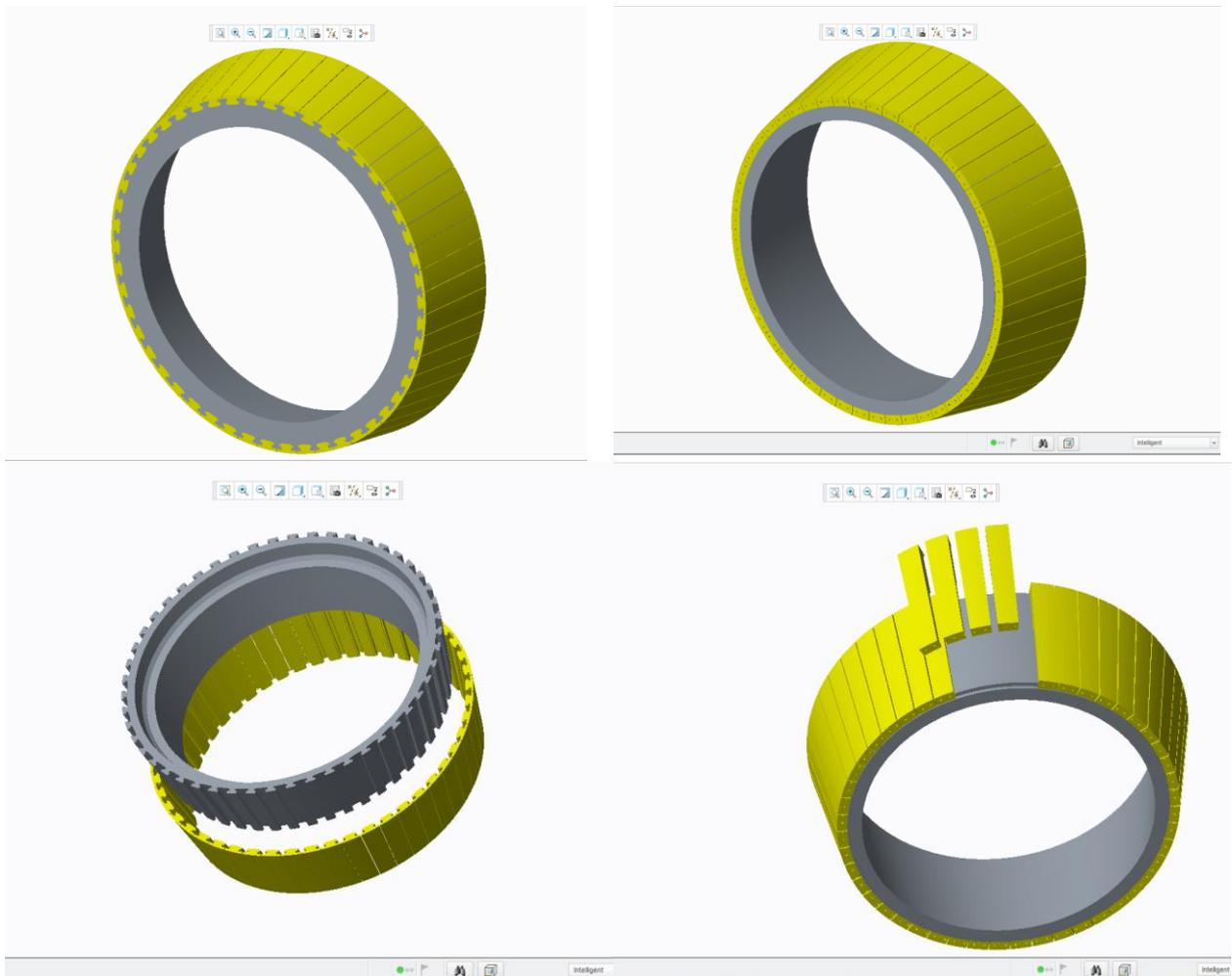
Pour cela on a proposé des concepts qui répondent presque à toutes les exigences :

- **Résistance à la température de service.**
- **Un bon comportement avec la fatigue à température élevée.**
- **Une meilleure résistance à l'usure abrasive.**
- **Une longue durée de vie.**
- **Un coût minimum**

#### 4. Génération des concepts

*Les deux concepts qu'on a proposés sur PTC Creo*

En effet l'idée vient du fait que le carbure résiste plus à l'usure à température élevée, mais il est relativement cher. D'où vient le fait de séparer le bandage en deux parties.



**FIGURE 47 : LES NOUVEAUX CONCEPTS PROPOSES**

- la partie extérieure est un concept défini par un matériau qui représente une bonne résistance à l'usure abrasive, en plus le carbure de bore est le meilleur élément résistant au choc et à la température élevée.
- la partie intérieure est un concept défini par un matériau qui résiste plus à la fatigue à température élevée, en effet l'acier inoxydable 410 présente une meilleure résistance à la fatigue avec un coût inférieure à celle du Ni hard 4.

## 5. Étude de faisabilité

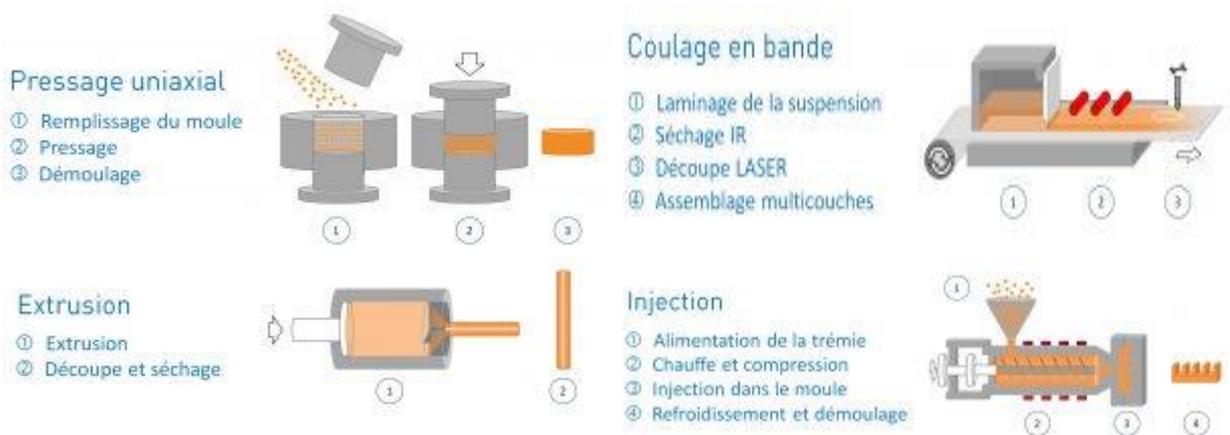
Dans cette partie on va vérifier que la réalisation des deux concepts soit techniquement faisable et économiquement viable.

### 5.1. Faisabilité technique.

Effectivement pour le maillon intérieur on n'a pas grand changement dans le procédé de fabrication, car on n'a pas effectué une grande modification dans les dimensions, c'est-à-dire le procédé de fabrication va être le même qui est le moulage en sable, procédé assez répandu pour les pièces de grande dimension.

En effet pour les morceaux en carbure on a réalisé une petite recherche dans laquelle on a vérifié est ce que ces pièces en carbure sont réalisables ou non.

Les céramiques sont des matériaux de grande dureté, non ductiles et à haute température de fusion. Les méthodes de fabrication conventionnelles par usinage, déformation plastique ou par fonderie sont donc peu appropriées ou impossibles pour ces matériaux. C'est pourquoi, les procédés céramiques consistent en la mise en forme d'une poudre préalablement à l'étape de consolidation de l'objet à haute température. On distingue plusieurs types de mise en forme exploitant différents états de la matière.



Ainsi on constate que ces procédés sont assez développés et répondent à notre besoin. De construire les deux modèles en céramique technique



FIGURE 48 : LES DEUX MORCEAUX PROPOSES EN CERAMIQUE

## 5.2. Rentabilité économique.

La rentabilité est visée dès la phase de conception de ces deux concepts, en effet dans cette conception on a visé trois grands partis d'anomalies.

- ✓ **Usure abrasive:** l'élément en contact avec le clinker représente une bonne résistance à l'usure abrasive c'est-à-dire on va augmenter la durée de vie et gagner en terme de matière broyé.
- ✓ **Fissure accidentelle :** en cas de fissure accidentel certainement on va perdre le maillon intérieur mais on ne va pas perdre tout le bandage car les morceaux en céramique sont toujours utilisables, en effet ils vont représenter plus que la moitié du prix du bandage c'est-à-dire un autre gain dans un cas accidentel qu'on peut rien faire pour l'éliminé.
- ✓ **Arrachement par crash :** les arrangements sont des anomalies qu'on rencontre souvent dans les bandages galets. Ils sont dus à des vibrations énormes causer dans le cas où on a du vide dans le lit de matière. En effet l'arrosage stabilise le lit de matière pour éviter ce problème mais les galets subissent toujours des arrachements dus aux vibrations, qu'on a constatées plusieurs fois durant la période de stage. Alors que le céramique présente une grande résistance aux chocs mais si au cas où pour une vibration extrême, on va perdre seulement une ou deux morceaux de céramique qu'on va les changer par d'autres morceaux en carbure. Ainsi un autre gain s'établit pour une anomalie qu'on ne peut rien faire pour elle, car malheureusement les arrachements ne sont pas rechargeables.

Enfin la faisabilité technique et la rentabilité économique nous donne l'envie de dépasser la phase de conception à la phase de prototypage et des essais laboratoire, mais en revanche il ne faut pas oublier que tout projet admis un risque qu'il faut analyser, c'est pour laquelle en attente vous fabuleux conseils et vos précieux remarques chers encadrants et membres du jury.

## 5.3. Simulation du nouveau concept galet

Dans cette partie on va faire une petite simulation pour vérifier les chargements et faire des comparaisons et conclure.

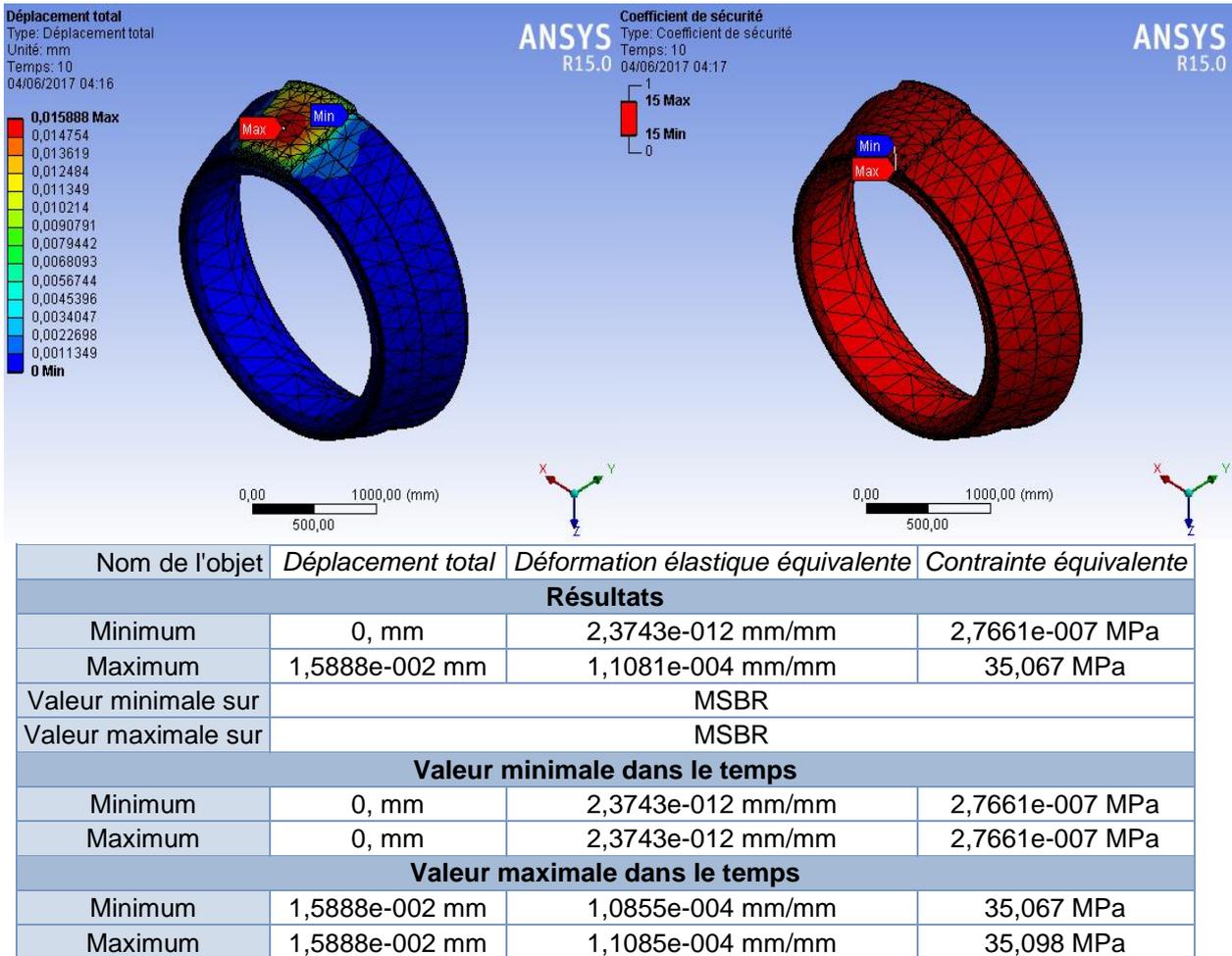


FIGURE 49 : VISUALISATION DES RESULTATS POUR LE NOUVEAU CONCEPT

Les nouveaux concepts vérifient parfaitement les conditions de chargement et présentent un facteur de sécurité FS supérieur à 15.

Chapitre 6:

# Etude économique

## Chapitre 6 : Etude économique

### Introduction

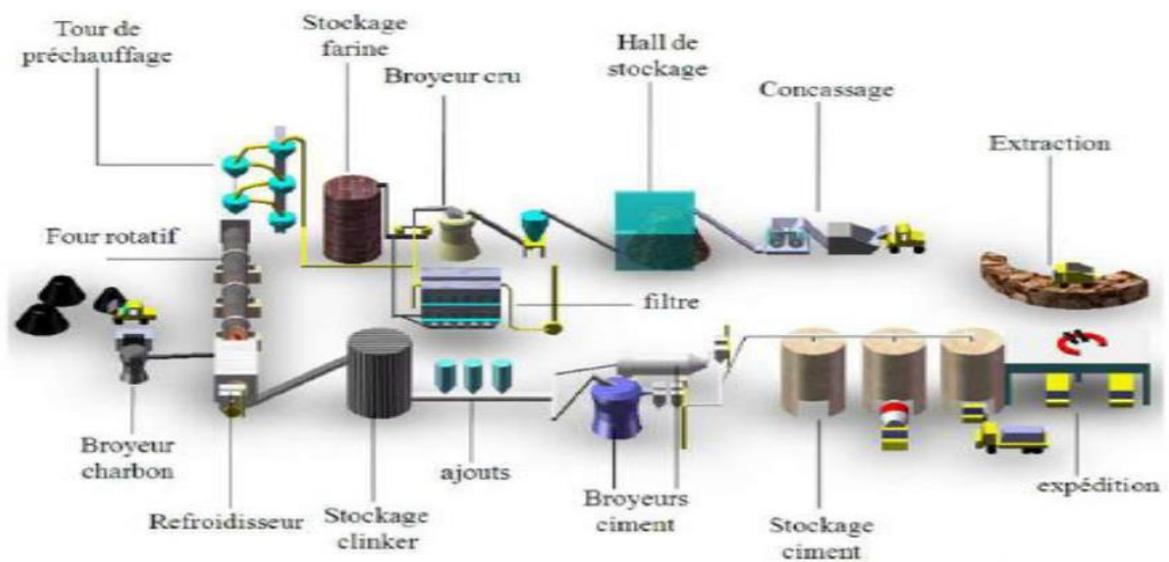
L'étude technico-économique consiste à déterminer le coût des solutions proposées, d'évaluer les dépenses causées par la maintenance et les arrêts de production, et ainsi, elle permet de chiffrer les gains réalisés par l'application des solutions.

### 1. Les Coûts des maintenances effectuées en cas d'usure des bandages galets et de la piste

Pour pouvoir effectuer cette étude, il faut connaître certaines informations permettant de déterminer les dépenses de l'entreprise pour la maintenance des galets et de la piste.

Les informations nécessaires sont les suivantes :

- ✚ Le débit du broyeur vertical BK4 est : 150 tonnes/heure.
- ✚ Le débit du broyeur cru est : 250 tonnes/heure.
- ✚ Le débit d'alimentation du four est : 180 tonnes/heure.
- ✚ Le cout de matière première clinker : 318,86 Dh/tonnes.
- ✚ Le cout d'énergie thermique consommé : 8,67 Dh /t.
- ✚ Le cout d'énergie électrique consommé : 38,21 Dh /t.



D'après la figure on remarque que la politique de production de la société est une politique de production en série, ainsi on comparant chaque poste de production on constate que le broyeur BK4 représente le poste goulot de cette chaîne de production. Par conséquent l'étude économique va se concentrer sur ce poste.

La maintenance du broyeur en cas d'une défaillance cause des arrêts de production, ce qui génère des coûts directs et des coûts indirects.

## 1.1. Les coûts directs ou coût de maintenance

Le bandage utilisé actuellement dans les galets est fourni par LOESCHE. Pour connaître son approvisionnement, le service de maintenance à consulter le magasin, qui nous a permis de connaître le coût du bandage qui est de 70 0000 dirhams, et le délai d'approvisionnement qui est de 37 semaines.

Le changement du bandage galet demande un arrêt de 24 heures.

- ✚ Le coût des composantes utilisées en cas de rechargement pour la piste et les galets : 3 340 Dh.
- ✚ Le cout des divers matériels utilisés au moment de changement du bandage galet : 996 Dh.
- ✚ Rechargement des galets et de la piste :

Cout fil en Dh	Cout fixe en Dh	Le poids déposé entre deux changements de bandage galet en Kg	La société	Cout total en Dh	Durée
500	201500	989,3	WELDI NG	696150	5 ans

## 1.2. Les couts indirects ou bien couts d'indisponibilités

Les coûts indirects sont les coûts qui on relation avec l'arrêt de production c'est-à-dire les pannes subits par la défaillance d'un équipement en plein production. Pour la politique de production en série ces pannes engendrant l'arrêt de toute la production. Ainsi on va estimer combien coute une heure d'arrêt non planifié.

### Raisonnons sur l'équation suivant :

Le prix de vente = la somme des coûts fixe (salaire des opérateurs ; loyer...) + coût de matière première (clinker) + le coût des traitements au niveau du broyeur bk4 + le gain.

Avec le coût des traitements au niveau du broyeur bk4 = le coût de l'énergie électrique consommée + le coût de l'énergie thermique consommé + le coût d'amortissement du broyeur BK4.

Alors la perte subie par une panne de Bk4 :

LA PERTE = Le prix de vente – (coût de matière première + le coût de l'énergie électrique consommée + le coût de l'énergie thermique consommé) ;

### Hypothèse de calcul :

- on travaille avec zéro stock, tout le ciment broyé est vendu.
- la cadence du vend égale au début de broyage.

Application numérique :

Une heure de perte de production =  $150 \times (1300 - (38,21 + 8,67 + 318,86)) = 140139$  DH ;

La variation de la cadence du vend implique une diminution de 25 % ;

=  $140139 \times (1 - 0,25) = 105000$  Dh/heurs ;

### Estimations du prix du Bandage en céramique

Le prix de la céramique carbure de bore : 250 DH/Kg ;

Le prix de l'acier inoxydable 410 : 8 DH/Kg ;

Le prix de du NI HARD 4 : 13 DH/Kg ;

Le poids de la partie en céramique : 1100 Kg ;

Le poids de la partie l'acier inoxydable 410 : 9870 KG;

Poids du bandage en Ni hard 4 : 13104 KG ;

Le coût de matière première de la couche superficielle en carbure de bore  $1100 \times 250 = 275000$  DH

Le coût de matière première du maillon intérieur en acier inoxydable  $9870 \times 8 = 98960$  DH

Le rapport poids carbure de bore sur le poids total du nouveau bandage = 0,11.

On va calculer le rapport prix des matières premières sur le prix d'achat pour le bandage en Ni hard 4:  $(13104 \times 13) / 700000 = 25$  %

Ainsi le prix du nouveau bandage :

$(275000 + 98960) / 0,25 = 1495840$  DH;

Le rapport prix des pièces en carbure de bore sur le prix total du nouveau bandage = 73 %

On se basant sur ces données on va estimer le bandage à 1500000 DH ; et la durée de vie minimale et de 5 ans.

### Le coût de maintenance d'un galet

Le galet master numéro 1 du broyeur ciment qui a vécu une longue durée de vie par rapport aux autres, a subi une usure avancée qui a demandé 6 rechargements pendant une période de 5 ans. La société LafargeHolcim a dépensé 696150 DH pour les 6 rechargements, en effet chaque rechargement de ce bandage à causer un arrêt de 6h c'est-à-dire 36 heures d'arrêt de production alors pendant 5 ans le coût de maintenance d'un galet et  $36 \times 105000 + 696150 + 700000 = 5176150$  DH;

### Conclusion

Cette étude a été réalisée sur un cas réel d'un galet master en plus on a donné des estimations sur la solution proposée, ainsi on confirme que le passage vers les céramiques devient nécessaire afin d'éviter les arrêts de production et augmenter les gains.

## Conclusion générale

Le contexte général de ce rapport se déroule autour de la résolution du problème d'usure au niveau des Broyeurs ciment BK4 et cru, Dans un premier lieu nous avons essayé de donner une présentation générale du groupe LafargeHolcim en citant les différentes activités, telles que la production du ciment, granulat, développement des produits et service à haute valeur ajoutée tel que le béton. Et aussi nous avons donné les différents événements clés qui ont marqué l'histoire de la société depuis sa création.

Dans la deuxième partie nous avons donné une description du processus de fabrication du ciment et une présentation du circuit du broyage, par la suite nous avons donné le principe de fonctionnement de système de broyage ainsi que ses différentes composantes.

Dans la troisième partie nous avons présenté le sujet de stage en utilisant le processus Créatif de Résolution de Problème.

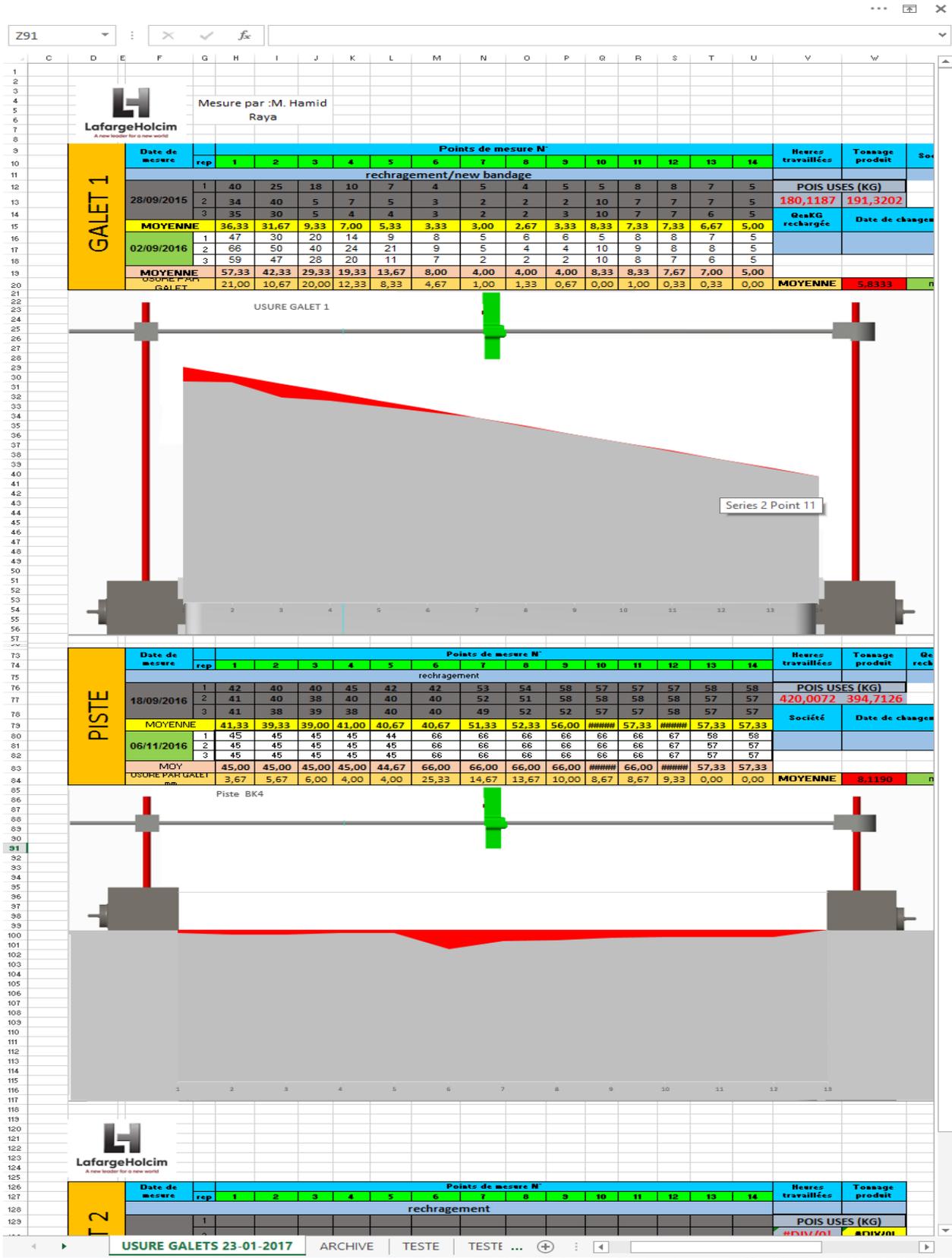
Dans la quatrième partie nous avons fait une étude et conception d'un système de mesure d'usure utilisé pour la piste et les bandages Galets au niveau des Broyeurs ciment BK4 et Cru.

Dans la cinquième partie nous avons proposé trois solutions pour le problème d'usure, tel que :

- ✚ Planification de changement de la piste pour le Broyeur ciment sur SAP.
- ✚ Proposition d'un fichier EXCEL pour le suivi d'usure avec des indicateurs qui aide à la décision de planifier un rechargement pour les galets et la piste, en utilisant un nouveau concept de mesure d'usure.
- ✚ Proposition d'une nouvelle conception pour les bandages galets et la piste.

# Annexe :

**Annexe 1 :** Représente les relevés des mesures d'usure avec leur représentation graphique de 28/03/2017, pour les deux galets maitres et la piste pour le Broyeur ciment BK4.





# Résolution du problème d'usure au niveau des Broyeurs ciment BK4 et cru



## Annexe 2 : Représente les organes a consigné

Site		Analyse de Risques Energies Dangereuses										Mesure de Contrôle et Actions Correctives																																
Référence de l'étude de risque (ERE)		Analyse d'Event LOTO										Plan d'actions Correctives																																
Date		Niveau de risque résiduel										Prévention des répétitions au risque																																
Equipement / Tâche		Niveau de risque résiduel										Prévention des répétitions au risque																																
Code HAC	Equipement	Operation	Type d'énergie dangereuse	Description	Source d'énergie	Fréquence	Probabilité	ENR	Niveau de Risque	Organes d'activation	Situation	Isolation	Vérification de l'isolation	Colmatage	Etat des Energies	Ty. Out. Etat	Fréq. Evén.	Prob. Evén.	Niveau de Risque	Action corrective	Requis Additionnels	Requis de Contrôle	Actions Correctives (niveau de risque résiduel)	Niveau d'Alerte	Requis Additionnels (niveau de l'Action Corrective)	Requis de Contrôle (niveau de l'Action Corrective)	Prévention des répétitions au risque	Requis de Contrôle																
302-EP1.M1	Broyeur cru	Remplacement des galets ou chemises galets; Remplacement ou rechargement de la pâte; Travail de maintenance à l'intérieur du broyeur; contrôle et nettoyage de la Camre d'Injection d'eau	Energie cinétique (Rotation de la pâte)	Entraînement par le moteur électrique de commande	Energie électrique	1	10	10	100	cellule Moyenne tension 3P1-151-UH	à la salle électrique P2	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	1	10	0																						
			Energie cinétique (Rotation de la pâte)	Entraînement par le moteur électrique du vaneur 302-EA1-121	Energie électrique	1	10	10	100	Inter-rupteur de consopateur du moteur vaneur	à côté du moteur vaneur	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	10	0																					
			Démarrage de la pompe basse pression de lubrification du réducteur	Lubrification Réducteur	Energie hydraulique	1	10	10	100	Inter-rupteur de consopateur des pompes SP 302-EC1-M1 et 302-EC1-M2	à côté des pompes SP	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	10	0																					
			Démarrage des pompes de lubrification des galets	Lubrification galets	Energie hydraulique	1	10	10	100	Inter-rupteur de consopateur des pompes de lubrification des galets 302-EC2-M1 et 302-EC2-M2 et 302-EC3-M1 et 302-EC3-M2 et 302-EC4-M1 et 302-EC4-M2	à côté des pompes	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	10	0																					
			Démarrage des pompes HP	Succionnement de la pâte	Energie hydraulique	1	10	10	100	Inter-rupteur de consopateur des pompes HP 302-EP1-M1 et 302-EP1-M2 et 302-EP2-M1 et 302-EP2-M2	à côté des pompes HP	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	10	0																					
			Energie cinétique	Mouvement des galets	Energie hydraulique	1	10	10	100	Inter-rupteur de consopateur des pompes hydrauliques 302-HP1-M1 et 302-HP1-M2 et la consopateur de la Vaste sortie réservoir hydraulique	à côté des pompes hydrauliques	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	10	0																				
			Energie gravitationnelle	Mouvement des galets	Energie hydraulique	1	10	10	100	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	NON	1	10	100	0																				
			Energie Potentielle gravitationnelle	Chute de machine et objets saufs au démarrage du SAS 302-SC1-M1 et la barre 302-RT1-M1 et la barre 302-RT2-M1 et la barre 302-RT3-M1 et la barre 302-RT4-M1 et la barre 302-RT5-M1	Energie électrique	1	10	10	100	Inter-rupteur de consopateur de la barre 302-RT1-M1 et la barre 302-RT2-M1 et la barre 302-RT3-M1 et la barre 302-RT4-M1 et la barre 302-RT5-M1	à côté de chaque équipement	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	10	0																				
			Démarrage du ventilateur Froids (Energie électrique)	Tirage ventilateur froid	Energie électrique	1	10	10	100	cellule Moyenne tension 3P1-151-UH + Consopateur ventilateur 302-100	Salle électrique P2	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	1	10	0																			
			Démarrage du ventilateur Froid (Energie électrique)	Tirage d'air chaud du ventilateur Froid	Energie électrique	1	10	10	100	Registre d'air chaud 302-CW2-M1 et 302-CW2-M2	Inter-rupteur de consopateur à côté des registres d'air chaud 302-CW2-M1 et 302-CW2-M2	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	10	0																			
			Energie cinétique	Écoulement d'eau en provenance du réservoir d'eau H2O THT-L1	Energie électrique	1	10	10	100	consopateur des vannes d'isolement 302-RI1-M1 et 302-RI1-M2	Arrivées des vannes	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	1	1	10	0																			
			GAZ chauds	Gas chauds en provenance du four ou du foyer sécheur	Energie thermique	1	10	10	100	Les registres d'air chaud 302-CW2-M1 et 302-CW2-M2 et la barre 302-RT1-M1 et la barre 302-RT2-M1 et la barre 302-RT3-M1 et la barre 302-RT4-M1 et la barre 302-RT5-M1	Sectionneur consopateur au niveau de la barre de commande du foyer + registres de consopateur des registres d'air chaud 302-CW2-M1 et 302-CW2-M2	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	10	0																				
			Electrocinétique	Contact direct avec des câbles HT sous tension	Energie électrique	1	10	10	100	Dispositif de blocage de la cellule d'arrêt 3P1-151-UH et sectionneur de terre sur présence tension	Salle électrique P2	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	1	10	0																			
			Energie cinétique (Rotation de la pâte)	Entraînement par le moteur électrique de commande	Energie électrique	1	10	10	100	cellule Moyenne tension 3P1-151-UH	à la salle électrique P2	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	1	10	0																		
			Energie cinétique (Rotation de la pâte)	Entraînement par le moteur électrique du vaneur	Energie électrique	1	10	10	100	Inter-rupteur de consopateur du moteur vaneur	à côté du moteur vaneur	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	10	0																			
Energie cinétique	Mouvement des galets	Energie hydraulique	1	10	10	100	Inter-rupteur de consopateur des pompes hydrauliques 302-HP1-M1 et 302-HP1-M2 et la consopateur de la Vaste sortie réservoir hydraulique	à côté des pompes	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	10	0																							
Energie cinétique (Rotation de la pâte)	Entraînement par le moteur électrique de commande	Energie électrique	1	10	10	100	cellule Moyenne tension 3P1-151-UH	à la salle électrique P2	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	1	10	0																					
Energie cinétique (Rotation de la pâte)	Entraînement par le moteur électrique de commande	Energie électrique	1	10	10	100	Inter-rupteur de consopateur du moteur vaneur 302-EA1-121	à côté du moteur vaneur	OUI	NON	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	OUI	1	10	10	0																						

## Références :

- <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7>
- <https://www.loesche.com>
- <http://www.parker.com/literature/cylindre%20Europe/cylindre%20Europe>
- <https://www.tomtomtools.com>
- <https://www.holcim.ma>
- <http://www.cttc.fr/expertises/technologies-et-procedes-ceramiques/>
- <https://www.bibli.ec-lyon.fr/exl-doc/smezlini.pdf>