

Chapitre II: Description et étude du fissure

I.1. Présentation du broyage :

Le broyage est une opération de mise en forme des solides, elle vise à diminuer et à maîtriser la granularité des solides, dans le but de faciliter les étapes ultérieures du traitement des produits, manutention, conditionnement, mise en suspension. Cette technique présente une large utilisation dans le domaine industriel, elle peut être effectuée suivant deux voies, la première sèche (broyage sec) ou bien humide (broyage humide).

Avec le développement technologique, le broyage est devenu omniprésent dans le monde des industries métallurgique, chimique, pharmaceutique, agroalimentaire ...ect. Cette variété de discipline résulte en fait des multiples aspects que revêtent ces procédés et des nombreuses utilisations qui en résultent.

A titre d'exemple dans l'industrie minérale, on enregistre l'utilisation de deux termes pour qualifier la fragmentation ; le concassage et le broyage. Le concassage présente la première étape de fragmentation du produit brut pour faciliter sa manutention et le préparer pour la fragmentation ultérieure (le broyage).

Elle peut être définie comme l'ensemble des opérations ayant pour but de réaliser, grâce à l'application de la contrainte mécanique externe:

- Soit la division d'une masse solide en fragments dimensions maximales déterminées.
- Soit la réduction d'une dispersion solide, existante jusqu'à des éléments de plus petite valeur unitaire. [2]

Le broyeur cru (Figure II-1) se compose essentiellement de :

- Moteur principale.
- Galets avec bandage.
- L'ensemble Vérin hydraulique avec deux accumulateurs.
- Goulotte d'alimentation.
- Piste de broyage.
- Séparateur.

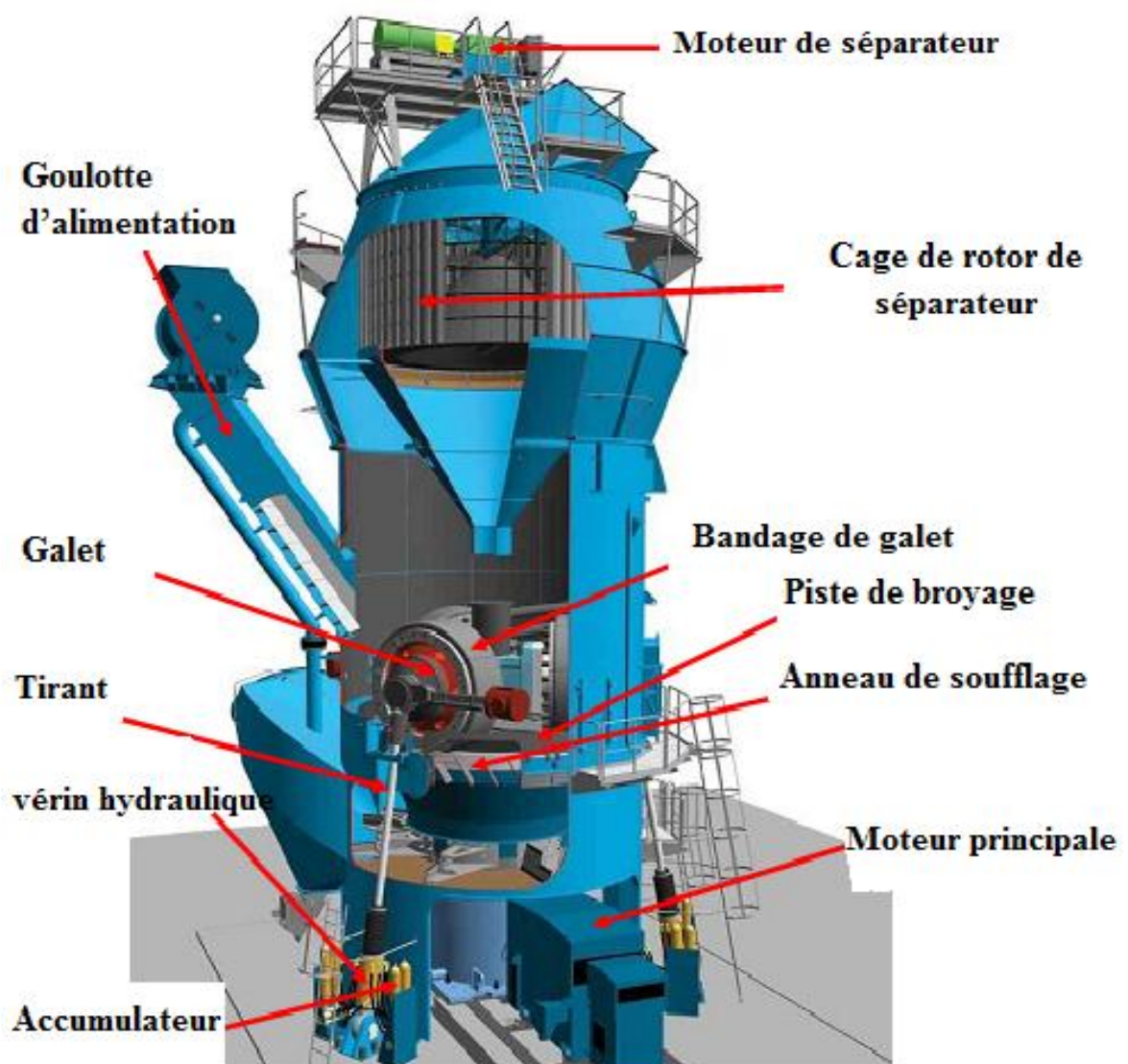


Figure II-1: L'ensemble du broyeur vertical (cru). [1]

II-2. Principe de fonctionnement du broyeur vertical :

Cet atelier est composé essentiellement du broyeur cru, il commence de l'extraction de la matière des trémies d'alimentation jusqu'à son stockage dans les silos d'homogénéisation, en tenant compte de l'ensemble du système de filtration des gaz ainsi que le circuit aéraulique du broyeur.

Le broyeur à galets intègre trois opérations dans une unité:

- ✓ le broyage.
- ✓ le séchage.
- ✓ la séparation.

Il fonctionne suivant le processus ci-dessous :

Le broyeur de matières premières utilise la pression et le cisaillement généré entre les galets et la table tournante pour écraser et broyer les matières première .la matière d'alimentation est dirigé sur la table de broyage par la goulotte d'alimentation. La rotation de la table de broyage accélère le matériau vers la piste de broyage et le passe sous les rouleaux. Plus grandes bosses matériau plus grossier et tombe à travers l'anneau de tuyère - et qui est éventuellement recyclé dans l'entrée de matière d'alimentation.

Un flux de gaz chaud arrivant par le bas à travers l'anneau entraîne la matière et la transporte entièrement ou partiellement au séparateur installé au-dessus de la chambre de broyage (circuit interne). En même temps il sèche la matière.

Humidité s'évapore presque immédiatement que le courant de gaz transporte la portion plus fine du matériau dans le séparateur.

Le séparateur sépare la matière contenue dans le flux gazeux en produit fini et gruaux. Les gruaux retombent au centre de la table de broyage. Le produit fini est extrait avec le flux gazeux. L'effort nécessaire au broyage de la matière est généré par un système hydraulique (trois vérins hydrauliques) qui permet un réglage en continu de la pression, en vue d'adapter l'effort de broyage à l'état d'exploitation du broyeur. Les vérins hydrauliques garantissent une introduction de force identique dans les galets par l'intermédiaire de tirants, en conservant une mobilité maximale. [1]

Le carter contient une grande porte qui permet un accès facile à l'intérieur pour les travaux d'entretien

II-3 Les galets du broyeur vertical :

Les galets se composent de huit bandages (revêtement de broyage). Les bandages de galets en fonte anti-usure sont fixés sur le corps de galet avec les anneaux de serrage et les boulons filetés. (voir Figure II-2)

Le palier est étanché par la bague à lèvres, de l'air d'étanchéité est conduit vers les galets par l'intermédiaire du porte-galet, afin d'éviter la pénétration de poussière dans les paliers à galets-support, Les paliers des galets de broyage sont alimentés en lubrifiant nécessaire à l'aide d'un graissage à circulation d'huile

La température d'huile des paliers à galets-support est contrôlée par les thermomètres à résistance électrique. Le niveau d'huile dans chaque galet est surveillé par des sondes d'huile capacitives. Les bagues à lèvres sont alimentées en huile de l'extérieur par l'intermédiaire du dispositif de graissage à l'aide de la conduite d'air d'étanchéité. Des réservoirs situés à l'extérieur du broyeur, à un endroit facilement accessible, plus haut que le point le plus élevé de la conduite d'air d'étanchéité intérieure (max.2m), servent de réserve d'huile. La pression statique de l'huile ainsi présente est suffisante pour assurer l'alimentation en huile. Les crochets peuvent être décalés parallèlement à l'axe. Par ce décalage, l'état d'usure des outils de broyage peut être influencé [1]



Figure II-2 : galet du broyeur vertical. [2]

II- 4 Le plateau de broyage :

Le plateau de broyage est monté directement sur la bride de sortie du réducteur. Une isolation thermique protège le plateau de broyage contre une charge thermique résultant des gaz chauds. La matière à broyer tombe au centre du plateau de broyage en rotation, et sous l'effet de la force centrifuge, elle est entraînée sous les galets. La hauteur du lit de matière peut être ajustée par l'anneau de retenue supplémentaire. [1]

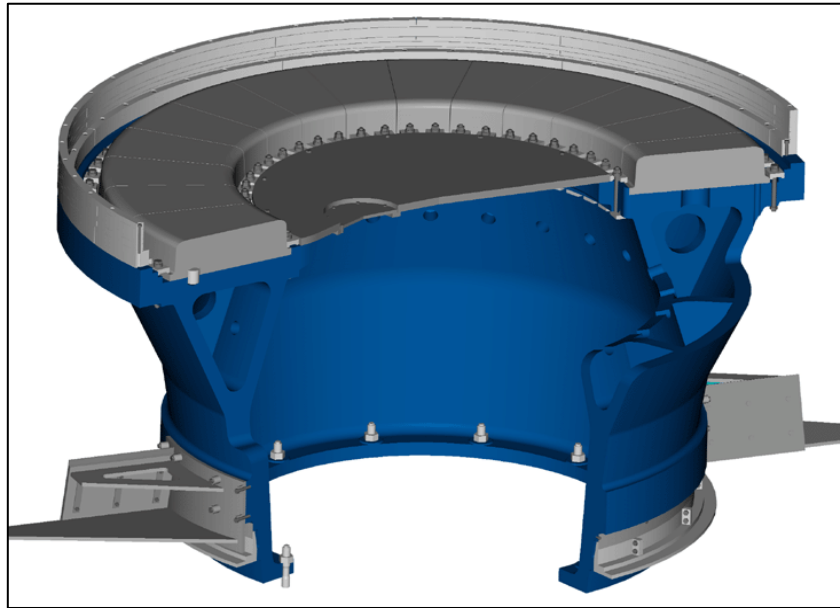


Figure II-3 : Le plateau de broyage [2]

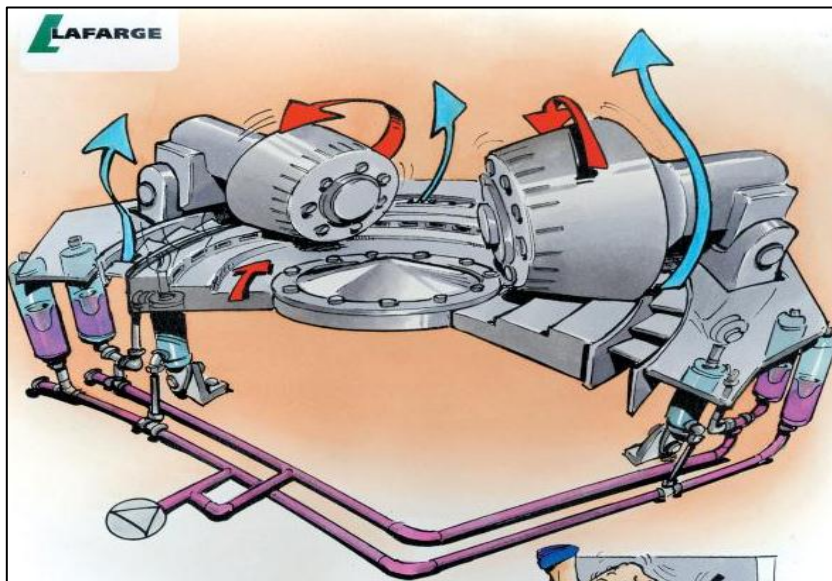


Figure : II- 4 : Mouvements des galets sur le plateau. [1]

II-5 La Force de broyage :

La force de broyage appliquée sur les galets peut être ajustée en fonction des besoins d'exploitation. Ceci est avantageux surtout pour la marche à un régime inférieur au nominal, ce qui favorise l'exploitation en charge partielle de la machine. La rentabilité constante est assurée sur une grande plage de débit (voir figure II- 5). [1]

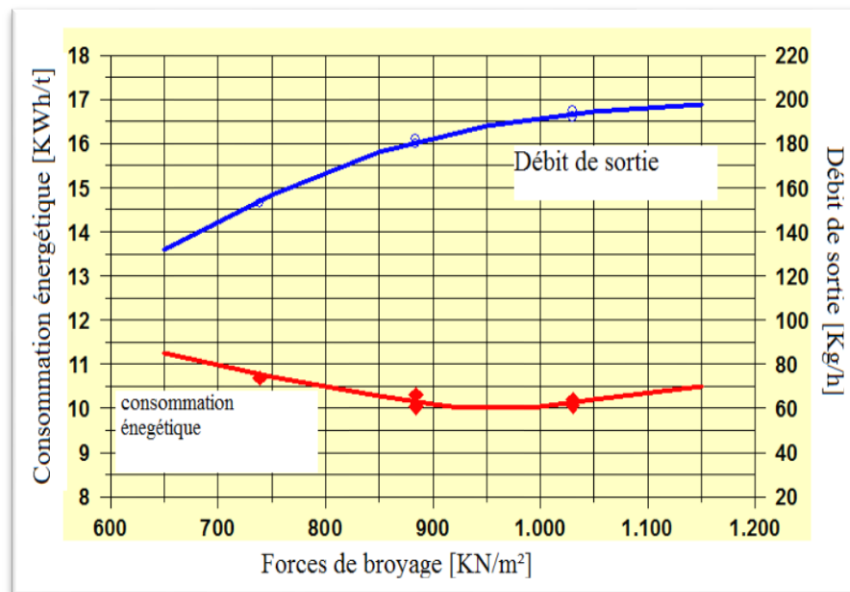


Figure II-5 : Efficacité de broyage en fonction de la force de broyage [1]

II-6 Le séchage :

Le broyeur cru est conçu pour effectuer également l'opération de séchage. Cette capacité est efficace même pour la matière dont l'humidité atteint 20%. Cela se fait sous l'effet du flux gazeux parvenant du four à travers l'anneau de buse. Ce flux transporte la matière vers le séparateur au-dessus du compartiment du broyage. L'anneau de buse est la zone du broyeur à galets où la section est la plus réduite.

La vitesse des gaz dans l'anneau de buses est un paramètre décisif pour le procédé de broyage. Lorsque la vitesse des gaz est diminuée par augmentation de la section des buses, une plus grande quantité de matière tombe à travers l'anneau de buse. L'élévateur de recirculation est donc alimenté avec une quantité de matière plus importante.

Le flux gazeux y transite à vitesse élevée, entraîne la matière débordée de la table et la transporte en haut vers le séparateur. La vitesse des gaz est comprise entre 45 à 60 m/s.

L'anneau de buse est réglable de l'extérieur à l'aide de tiroirs permettant d'ajuster la section de passage (voir figure II- 6). Et donc le débit de matière passant à travers aux conditions requises. [1]



Figure II- 6 : Position de tiroir de réglage pour l'anneau de buse.

La partie de la matière qui tombe à travers l'anneau de buses est envoyée au séparateur par un élévateur à godets (circulation externe). Elle sera remise dans la goulotte d'alimentation, avec la matière fraîche en amont du sas.

Le concept de recirculation externe permet de limiter la perte de charge du broyeur en privilégiant le transport mécanique de la matière du plateau de broyage au séparateur. [1]

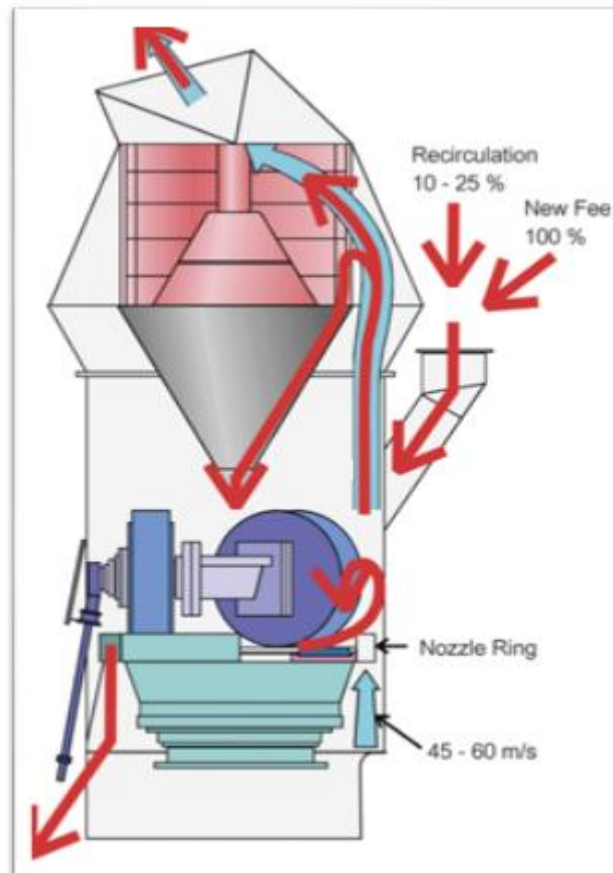


Figure II-7 : Circuit interne de la matière. [2]

II-7 La séparation :

Dans le broyeur, il existe une forte recirculation interne qui assure une pré-séparation à plusieurs niveaux. Ainsi, selon la taille des particules, celles-ci seront entraînées plus ou moins haut dans le broyeur et retombent sur la table si elles ne sont pas suffisamment broyées.

Le séparateur (voir figure II- 8), se trouvant en haut de la cellule de broyage, classe la matière contenue dans le flux gazeux en produit fini et en gruaux. Les gaz chargés de ces poussières traversent les pales fixes du séparateur et sont mises en rotation. Sous l'effet de la gravitation et des gaz circulants, combinés aux pales dynamiques et statiques, la séparation se réalise. La matière fine est conduite à l'aérogilissière du produit fini. C'est dans cette zone de séparation entre pales fixes et rotor que se produit la sélection du produit fini. La matière grossière tombe vers le bas dans le collecteur de gruaux et est de nouveau reconduite dans le processus de broyage. [1]

Le produit fini est extrait avec le flux gazeux pour être soit séparé directement dans un filtre (système à 2 ventilateurs), soit pré-séparé dans des cyclones et dépoussiérés dans un filtre monté en aval (système à 3 ventilateurs)

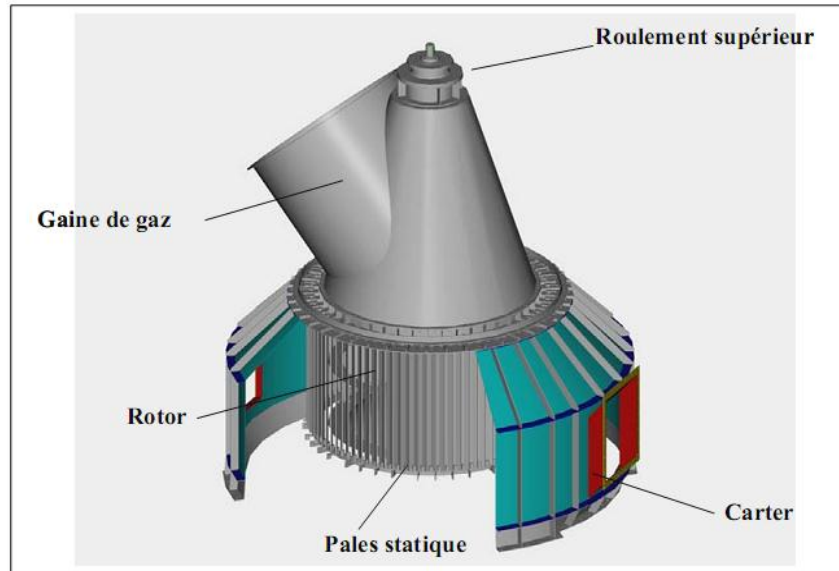


Figure II-8 : Séparateur dynamique. [1]

II-8 Equipements annexes :

II-8-1 Système d'injection d'eau :

L'injection d'eau permet d'assurer un meilleur maintien de la matière sur la table de broyage. Une attention particulière doit être apportée à la direction de l'injection pour que celle-ci ne rentre en aucun cas en contact avec les éléments chauds du broyeur (galets, piste des galets, etc.), mais uniquement en contact avec la matière.

La quantité d'eau injectée dépend des propriétés de la matière première, en particulier son niveau d'humidité, ainsi que du comportement du broyeur au niveau vibratoire.

L'injection d'eau se fait avec un débit de 5000 l/h au maximum, mais pratiquement ce dernier est maintenu aux environs 3000l/h.

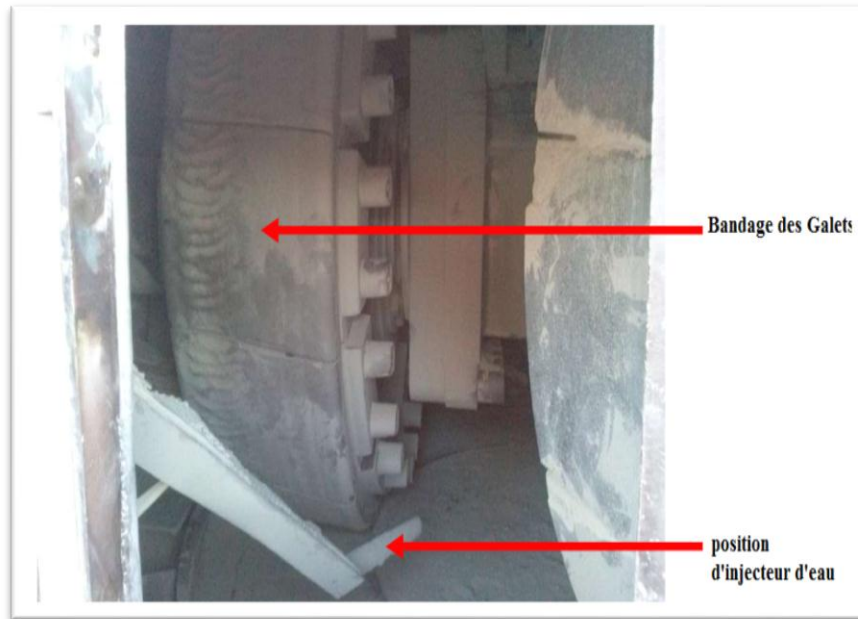


Figure II-9 : Injection de l'eau en amont du galet.

II-8-2 Système hydraulique :

Le maintien des galets est assuré par un système hydraulique, il permet une application identique des forces sur les galets tout en maintenant un maximum de liberté de mouvement. Ce système est constitué de un vérin pour chaque galet, l'un est moteur exerçant la pression nécessaire pour l'écrasement de la matière, l'autre est fixe.

Le système hydraulique permet le réglage en continu de la pression pour ajuster les forces de broyage en fonction des paramètres de production. Au démarrage du broyeur, les forces de broyage appliquées sur les galets sont réduites par la diminution de la pression hydraulique. Cela permet de réduire le couple lors du démarrage.

Chaque vérin hydraulique est relié à deux accumulateurs à piston qui amortit les à-coups du broyage. En effet, les galets sont toujours maintenus en position horizontale. [2]

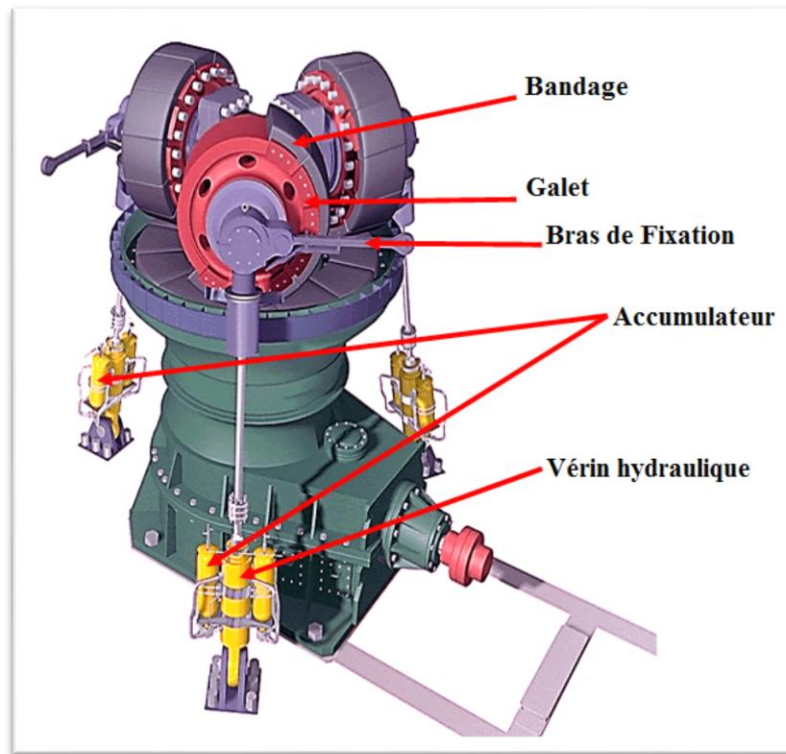


Figure II- 10 : Système hydraulique tirant un train de galet. [2]

II-8-3 Déducteur de métaux (bande magnétique) :

Les différentes matières, pré homogénéisées plus les ajouts, sont confondues sur un même transporteur avant d'intégrer la cellule de broyage. Ce transporteur est équipé de deux dispositifs de détection des métaux. En premier lieu, nous trouvons un dé ferrailleur à bande qui permet d'extraire les éventuels morceaux de ferraille susceptibles d'être présents dans le mélange. Un clapet automatique bascule l'aval du transporteur hors la cellule de broyage pour éviter leur introduction.

Le second dispositif est un aimant qui est branché sur la chute entre le broyeur et l'élévateur, pour la matière qui déborde le plateau. Il a pour but d'extraire les petits morceaux de fer ou les corps étrangers se trouvant encore dans la matière.

II-8 - 4 Désignation de l'organe incriminé

L'organe suscitant l'étude est le bandage du galet du broyeur, en effet il s'agit d'une structure torique en fonte blanche fortement alliée en chrome afin de lui conférer une certaine dureté contre l'usure. En effet Le bandage joue un rôle primordial dans l'écrasement de la matière contre la table de broyage.

II-9 Endommagements ou difficultés constatés :

La défaillance du bandage du galet peut avoir débuté dans un passé lointain ou s'être produite brutalement. Il est donc nécessaire d'adopter une démarche prudente pour son analyse et de recueillir tout d'abord le maximum d'informations sur :

- ❖ Ses circonstances.
- ❖ Les conditions de service.

Il faut également rassembler toutes les données concernant le matériau, sa nuance, son origine, les traitements mécaniques, thermiques, thermochimiques et de surface que la pièce a subis.

II-9-1 Observations :

Après une première inspection du bandage, il s'est avéré qu'il n'a pas subi une usure uniforme suivant la circonférence, ce qui reflète une différence de distribution des contraintes lors du broyage. (Voir Figure II-12)



Figure II-11 : Profil du bandage fissuré.

On remarque aussi la présence de trace de corrosion au niveau de la fissure. La rouille pourrait commencer à l'intérieur par oxydation du matériau (voir Figure II-12).

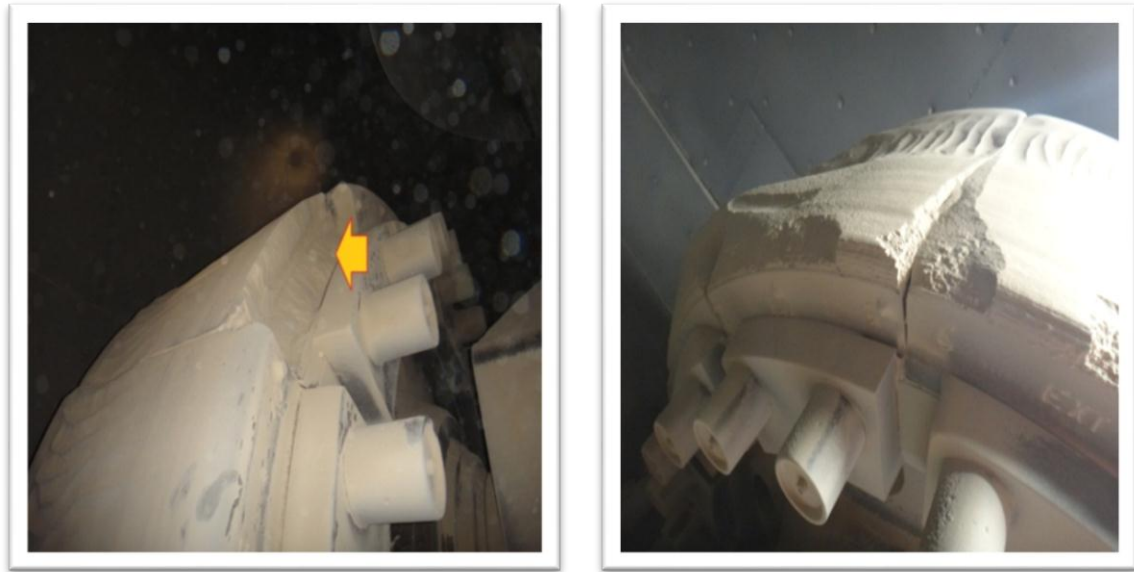


Figure II-12 : La présence de signe de corrosion au niveau de la fissure.

II-9-2 Matériau utilisé :

Le matériau est une fonte blanche alliée. Après la correspondance avec le fabricant MAGOTTEAUX®, nous avons pu obtenir les caractéristiques mécaniques du matériau ainsi que la composition chimique.

II-9-3 Composition chimique :

La fonte utilisée a une teneur en carbone de 3%, on sait bien qu'un matériau ferreux est appelé fonte si la teneur en carbone dépasse environ 2,2 %.

Lorsque l'on a besoin d'une fonte possédant des propriétés particulières, on peut faire appel à ce type de fonte, alliée ou spéciale, dont les éléments d'addition peuvent faire varier les propriétés physiques, chimiques ou mécaniques.

Le matériau utilisé pour les galets ainsi que la table doit répondre à des exigences contre l'usure à haute température induite par le frottement. La fonte en question appartient à la catégorie des fontes qui sont des fontes à structure martensitique, dont la caractéristique principale est la résistance à l'usure, et ce jusqu'à 700°C.

Désignation du constructeur	% Cr	% Mn	% C	% autres
FMU-18	16	2	3	Ni +Mo

Tableau II-1 :Composition chimique du matériau du bandage.

II-9-4 Désignation normalisée :

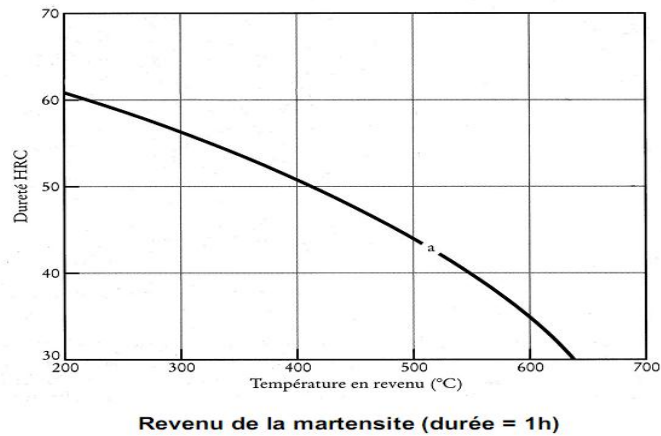
Nous adoptons la norme NF A32-401 pour les fontes blanches de matrice martensitique composées de carbure :

FB Cr Mn 16 2 Mo Ni

II-9-5 Traitement thermique :

L'obtention des renseignements sur les traitements thermiques appliqués sur le bandage s'est avérée difficile à cause de leur confidentialité par le constructeur, néanmoins, pour les nuances contenant de 12 à 26 % de chrome, on prévoit que l'obtention de la structure à prédominance martensitique du bandage était par un conditionnement de l'austénite à température élevée (de l'ordre de 1 000°C avec maintien prolongé) suivi d'un refroidissement rapide dans la trempe superficielle, seule une mince couche de métal en surface des pièces est transformée en austénite par chauffage (850 à 980°C), puis en martensite par refroidissement effectué le plus souvent par aspersion.

Le durcissement par trempe superficielle de la fonte permet d'améliorer économiquement sa résistance à l'usure, à la fatigue et à la corrosion.



**Figure II-13: Dureté d'un matériau martensitique
En fonction de la durée de revenu. [7]**

La martensite est une phase sursaturée en carbone ($\%M_{\text{artensite}} \gg \%F_{\text{errite}}$), ses grains ont la forme d'aiguilles ou de plaquettes très fines.

II-9- 6 Caractéristiques mécaniques :

Ces caractéristiques nous ont été données par le constructeur .Elles sont classées dans

Le tableau (II-2).

Dureté HRC	Limite élastique et charge de rupture (MPa)	Ténacité (MPa.m^{1/2})	Module d'élasticité (N/mm²)	coefficient du poisson
65,8	481	30,7	225120	0,28

Tableau II-2 : Caractéristiques mécaniques du matériau FMU18.

La valeur de la dureté obtenue par l'analyse d'un échantillon est illustrée dans le tableau (II-3) :

Désignation	Valeurs de duretés HRC	Moyenne
Echantillon en fonte	53-54-50.6-52.8-55.8-50	52.7

Tableau II-3 : Dureté d'un échantillon du bandage.

On remarque d'après le résultat de l'essai de dureté obtenue. La dureté réelle du matériau est inférieure à celle prévue par le constructeur, ce qui prouve que les conditions de travail du galet diminuent la dureté du matériau et sa résistance mécanique.

II-9-7 Amélioration possible :

La faible résistance à la rupture et aux chocs de la fonte blanche alliée au chrome augmente le risque de fissuration de la pièce d'usure réalisée.

Suite à notre étude des facteurs à effets néfastes sur le matériau, à savoir l'usure et la corrosion sous contrainte dans les phrase suivants, nous proposons d'adopter une autre nuance aussi résistante à l'usure mais qui a l'avantage de résister contre l'oxydation par corrosion sèche et humide, Il s'agit de la fonte à carbure de chrome (Cr_3C_2). En plus de sa résistance à l'usure, elle présente une bonne résistance à l'oxydation jusqu'à 900°C. [2]

II-9-8 Condition d'utilisation prévue :

Le bandage est soumis à des contraintes de compression radiale ainsi que des contraintes de cisaillement, chocs et sollicitations mécaniques de surface.

Le matériau antagoniste du bandage est bien évidemment le cru, le débit du broyeur est de 450 t/h alors que le constructeur préconise un débit qui ne doit pas dépasser 400 t/h, le broyeur fonctionne dans un environnement en dépression allant jusqu'à -54 mbar, sous une température moyenne de 130°C et avec une humidité assez élevée (présence de la vapeur d'eau), l'écart de température est élevé puisque la température d'entrée des gaz est de l'ordre de 280°C alors que la température de leur sortie se situe aux alentours de 90°C..

II-10 Circonstances de l'incident :

La fissure ou la rupture du bandage sont des incidents peu fréquents certes, mais qui produisent des dégâts très importants au niveau du broyeur et au niveau de la production de la matière crue. La fissure est survenue après 12000 heures de fonctionnement, il faut noter aussi que parmi les constatations qu'on a effectuées avant l'incident, on trouve une forte vibration qui dépassait le seuil fixé par le constructeur qui est de 3 mm/s, ainsi qu'une déformation initiale qui seront traités au cours de notre étude.

II-10-1 Inspection du niveau vibratoire du broyeur cru :

II-10-1-1 Etude des vibrations :

Les efforts causent à leur tour de vibrations qui vont endommager les structures et les composants des machines. L'analyse de ces vibrations va permettre d'identifier les efforts dès qu'ils apparaissent, avant qu'ils n'aient causé de dommage irréversible. Elle permettra aussi après analyse d'en déduire l'origine et d'estimer les risques de défaillance

II-10-1-2 Outil de mesure :

Les vibrations au niveau du broyeur sont mesurées par un capteur de vibrations placé sur le réducteur.



Figure II-14 : Position du capteur vibrations.

La tension transmise par le capteur est proportionnelle à la vitesse des vibrations. Le niveau de vibrations est suivi par les opérateurs de la salle de contrôle, qui arrêtent le broyeur dans le cas de fortes vibrations.

II-10-1-3 Conditions d'utilisation :

Le suivi se fait par un contrôle global des enregistrements pris par le capteur de vibration, dans ce genre de contrôle, l'amplitude est un indicateur primordial. En marche normale, l'amplitude doit varier entre 2 et 4 mm/s, si elle dépasse 6 mm/s le broyeur s'arrête automatiquement, L'enregistrement suivant représente l'état de marche de la machine pendant le

mois avant fissuré, nous le considérons exemplaire suite à l'amplitude qui reste dans les limites préconisées.

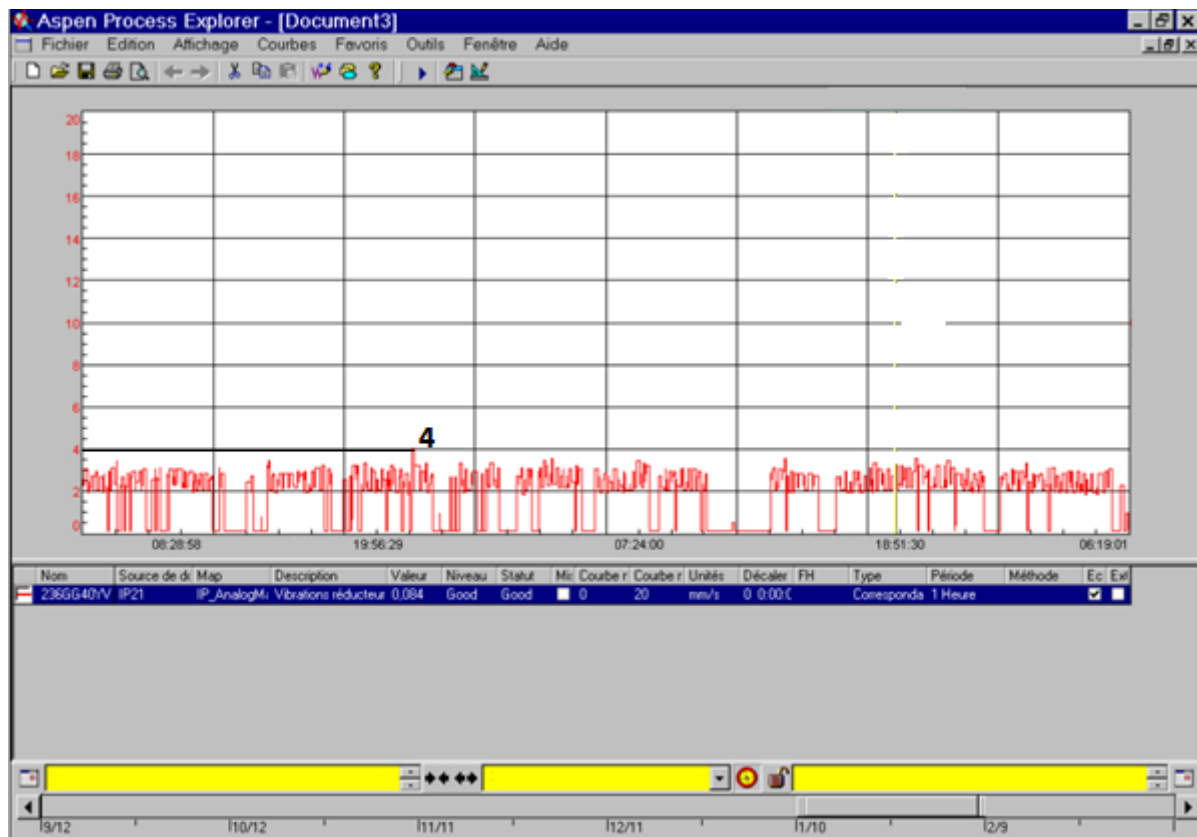


Figure II-15: Relevé du niveau vibratoire du broyeur avant de défaillance [1]

Remarque:

Lorsque des fissures sont apparues quand il a atteint le niveau de vibration **5.8**

(Voir Figure I-16). Il faut noter que pendant cette période, la fissure sur le bandage du galet est à son apogée, ce n'est pas étonnant car ce genre de défaillance est indétectable par un contrôle global de vibration. La fissuration du galet qu'on traite actuellement n'est pas un accident brusque, elle devait avoir le temps pour progresser durant une certaine période, surtout si on prend en considération les caractéristiques de la fonte utilisée ainsi que l'épaisseur de la pièce. Les résultats sont inquiétants les amplitudes ne sont pas normales

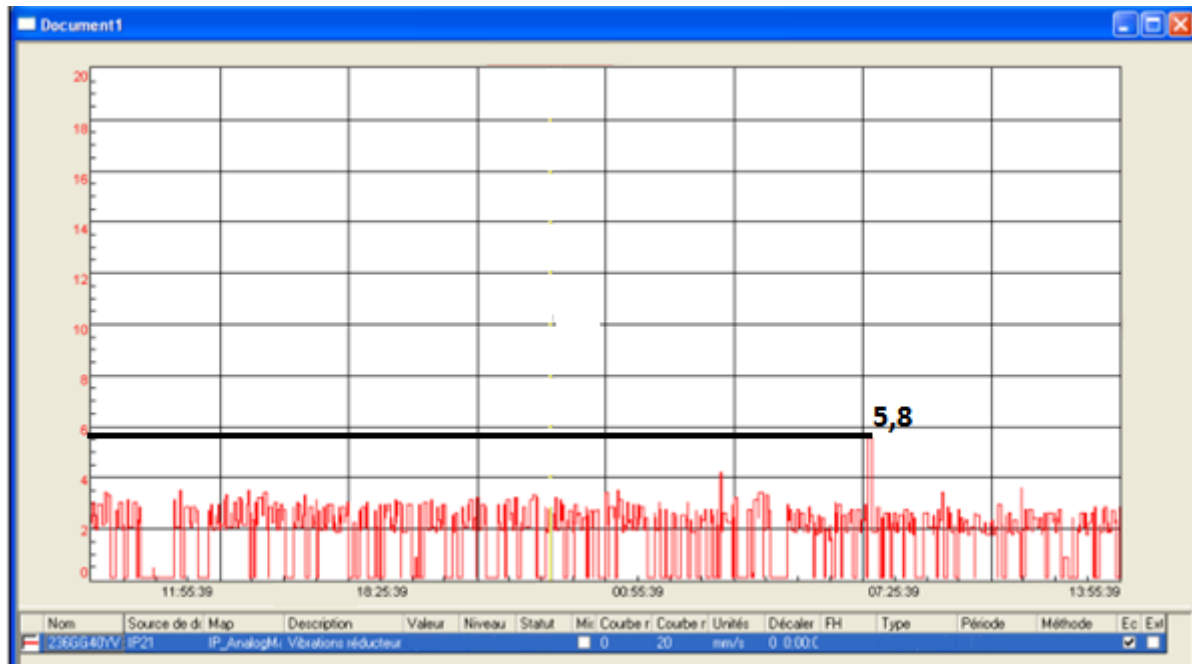


Figure II-16 : relevé du niveau vibratoire du broyeur cru en période de fissure. [1]

II-10-2 Analyse des différentes causes des vibrations :

Les vibrations continues dans le broyeur vertical peuvent être dues à plusieurs facteurs. Ces facteurs sont directement liés aux différents paramètres influençant sur le fonctionnement du broyeur.

II-10-2-1 L'épaisseur de la couche de matière :

L'épaisseur de la couche de la matière est réglée par l'anneau de retenue placée sur le bord extérieur de la table de broyage.

Cette épaisseur est contrôlée en fonction de plusieurs paramètres comme :

- ✓ La stabilité de la matière pendant le broyage.
- ✓ La matière.
- ✓ Le niveau des vibrations.

Dans le cas où cette épaisseur diminue, les vibrations deviennent fortes, ce qui mène à l'arrêt du broyage afin d'éviter toute défaillance possible.

II-10-2 -2 Anneau de buses :

L'anneau de buses est placé sur la partie intérieure du galet, il sert à contrôler le débit des gaz chauds. Dans le cas où cet anneau est bouché, le débit des gaz chauds devient insuffisant, et donc la matière ne peut pas être ni transportée complètement vers le séparateur, ni séchée. Ceci peut ainsi causer des vibrations au sein du broyeur.

II-10-2-3 La puissance absorbée par le moteur :

Quand la puissance absorbée par le moteur au démarrage est importante, elle entraîne de fortes vibrations au niveau de l'équipement, ce qui peut causer des endommagements et des défaillances remarquables à la machine.

II-10-2- 4 Les éléments de la matière première :

La matière première est composée généralement de :

- ✓ Argile + calcaire en grande quantité.
- ✓ . Le calcaire seul en quantité faible.
- ✓ Le sable et fer en très faible quantité.

La granulométrie de chacune de ces matières ne représente aucune anomalie, et donc elle ne représente aucun problème de broyage.

Donc, on peut déduire que la matière première n'est pas une cause des fortes vibrations que connaît le broyé.

II-10- 3 Causes susceptibles de la forte vibration :

Le niveau de la vibration est un paramètre très important pour le bon fonctionnement du broyeur. Le contrôle permanent a une nécessité primordiale comme on l'a déjà montré. L'augmentation de son niveau résulte de plusieurs facteurs :

- Réglage incorrect du broyeur.
- Anneau de soufflage bouché.
- Débit de gaz de transport insuffisant.
- Puissance de moteur principal trop important.

Certains facteurs ont un rapport direct avec la quantité de la matière entrante. En effet, le lit de la matière doit rester dans une certaine marge bien déterminée, l'excès de matière entraîne

une charge supplémentaire sur le moteur principal, d'où la grande puissance absorbée, ou encore une charge sur le flux élévateur de l'air chaud. Les pertes de charge de flux gazeux seront augmentées, Cependant, la cause principale, comme on va le découvrir à partir de cette étude, est un réglage incorrect du broyeur dû à l'usure excessive est déséquilibrée des galets.

II-10-3-1 Impact sur l'ensemble :

La vibration élevée touche l'ensemble du broyeur, et cause les problèmes suivants:

- Casse des boulonnages.
- Fissuration voire rupture des galets et du plateau.
- Défaillance des vérins et des tirants.
- Défaillance des roulements.
- Défaillance du réducteur.

L'élévation de la vibration augmente les heures d'arrêt du broyeur, ce qui affecte sa capacité à satisfaire le besoin du four en cru, ainsi que la stabilité du processus chimique d'homogénéisation.

II-10-3-2 Inspection sur la méthode de l'injection de l'eau ;

Les conduites d'injection sont orientées d'une part vers le centre du plateau de broyage et d'autre part en amont de chaque galet de broyage.

L'eau est amenée aux lances d'injection par le dispositif d'alimentation d'eau. La pression d'eau nécessaire est fournie par le groupe de pompes. La robinetterie ajoutée mesure et règle le débit d'eau à injecter.

II-10-3-3 Les exigences :

- Cette injection est nécessaire pour refroidir le gaz entrant dans le broyeur, avant d'accéder à la sortie.
- L'eau est essentielle pour stabiliser la matière au-dessus de la table, à condition qu'elle soit injectée directement sur la matière et surtout en amont des galets, ce qui maintient le niveau de vibration à des valeurs minimales. L'eau a aussi le rôle de figer la poussière descendant du séparateur sur les pistes du broyage.

II-10-3- 4 Mesures de sécurité :

- l'addition excessive de l'eau sur la table peut augmenter l'effet abrasif de la matière, elle peut aussi causer des chocs thermiques sur les différents organes au sein du broyeur.
- Blocage d'une ou plusieurs conduites.
- Usure de la buse l'injection de l'eau.

II-10-3-5 Préventions :

- L'injection de l'eau doit servir à conditionner la température de la matière. Le jet sur la table doit être en fonction de la vibration.
- La température de sortie des gaz doit être conditionnée par le taux d'injection de l'eau.
- On doit installer un débitmètre pour chaque conduite d'eau afin de vérifier l'équilibre en injection pour tous les galets.

Généralement, on n'a pas besoin de pulvériser l'eau injectée, un tube ouvert est suffisant.

II-10 - 4 Etude des contraintes thermiques induites :

Pour le cas du bandage du galet étudié, on distingue trois types de contraintes thermiques :

- ❖ Les contraintes dues aux travaux de démontage des galets afin de les inverser (chauffage par chalumeau).
- ❖ Les contraintes dues à une variation brutale de la température superficielle (ouverture des conduites d'eau pour stabiliser le lit de matière).
- ❖ Les contraintes dues à la convection thermique (cas de l'ouverture des portières du broyeur pour l'inspection).

La première catégorie de contraintes s'est manifestée lors de l'arrêt four qui a eu lieu le mois d'octobre, les équipes de maintenance mécanique ont procédé au retournement du bandage des galets du broyeur, or le galet fissuré a présenté une difficulté de son démontage du train de galet, ainsi l'équipe a procédé à un chauffage au chalumeau, procédure préconisé par le constructeur , de la zone bloquée mais pour un démontage définitif du galet.

La deuxième catégorie se montre lorsque la surface du bandage initialement à une température T1, qui vaut en moyenne 150°C, est porté à une température T2 inférieure à T1, le bandage aura tendance à se rétrécir, ce mouvement sera empêché par le galet. Il s'établit donc à

la surface des contraintes de compression qui sont équilibrées à l'intérieur par des contraintes de tension. Ces contraintes pourraient faire surgir des microfissures qui se transformeront par la suite à des fissures visibles à l'œil nu et ainsi conduire à la rupture du bandage.

Ces contraintes proviennent d'une part du jet d'eau versée sur la matière à broyer avec un débit qui atteint 2000 l/h, d'autre part, de l'arrêt répétitif du broyeur et l'ouverture des portes avant d'atteindre le degré de refroidissement suffisant. Ce phénomène influe non seulement sur les galets, notre cas d'étude, mais aussi sur l'ensemble des équipements et des pièces de montage : parois métalliques du broyeurs, conduites, table, plaque de l'anneau de buse...

II-10-5 Etude de la corrosion

Le jet d'eau sur la matière à broyer peut être un facteur corrosif pour les galets. En effet, l'eau distribuée dans les villes, appelée aussi l'eau douce, contient des ions de chlore (Cl) qui est un élément chimique très corrosif, ces ions exercent une action catalytique sur

La réaction suivent:

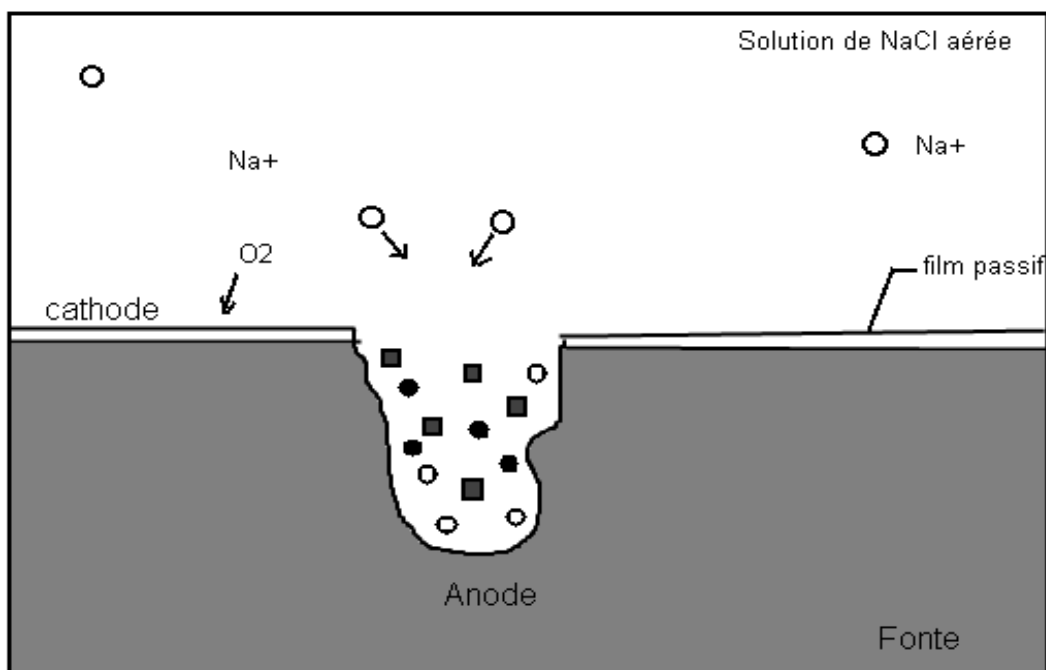


Figure II-17 : Représentation schématique du mécanisme de progression d'une piqure dans une fonte. [5]

La figure ci-dessus, montre que l'eau utilisée cause une fissuration par piqûres. Ce genre de fissure est particulièrement dangereux, car même dans le cas où la perte de poids du matériau est faible, si l'équipement est perforé, il faut le changer.

Dans les matériaux de grande résistance, comme dans notre cas, seule l'action des facteurs corrosifs ne peut pas causer une corrosion avec de grands dommages, mais si on ajoute l'action des contraintes mécaniques, la corrosion devient dans ce cas plus dangereuse, et peut mener à des fissures claires à l'œil nu, ou encore à la rupture.

II-10 - 6 Etude de l'usure des galets :

II-10-6 -1 Phases de vie d'un mécanisme :

Une pièce d'usure passe normalement par trois phases d'usure successives :

- l'ultime finition des surfaces lors du rodage.

Les actions sur les grosses aspérités diminuent avec le temps, les pics sont arasés progressivement tandis que les vallées restent intactes. Le taux d'usure et le facteur de frottement baissent, une nouvelle topographie remplace la rugosité originale de la pièce.

II-10-6-2 Dynamique d'usure des galets

Une usure anormale provient essentiellement de l'abondance de la matière sur les pistes, ce qui génère de la vibration excessive des galets, d'autres causes génératrices de la vibration sont traitées au paragraphe intitulé "inspection sur le niveau vibratoire". Néanmoins, même en absence de l'effet néfaste de la vibration excessive, l'usure reste difficilement contrôlable soit pour une paire de galets et même sur le même bandage. Cela résulte de la disposition des galets sur la table.

II-10-6-3 Contrôle de l'usure des galets :

- Instrumentation de mesure.

La mesure se fait chaque six mois par le visiteur de l'atelier broyage. L'appareillage utilisé est un gabarit de mesure dédié à cette opération. Il est constitué de pointeurs gradués en hauteur, Et dont la disposition est illustrée sur le schéma de la figure II-16 .



Figure II-18 : Gabarit de mesure de la taille d'usure du bandage [1]

II-10 -7 Usure du plateau :

II-10-7-1 Contrôle d'usure du plateau :

La table du broyeur subit également l'usure au niveau des pistes des galets. Etant fabriquée en même matériau que les bandages, la comparaison entre l'usure de la table et celle des bandages semble légitime.

II-10-7-2 Instrument de mesure :

La mesure de l'usure est effectuée à l'aide d'un gabarit préconisé par le constructeur et constitué, à l'instar du gabarit des galets, de 14 pointeurs s'étalant le long de la largeur de la piste. La visite du broyeur pour mesurer les côtes des pistes se fait parallèlement à la mesure des côtes des galets, rappelons que cette opération est effectuée tous les six mois.

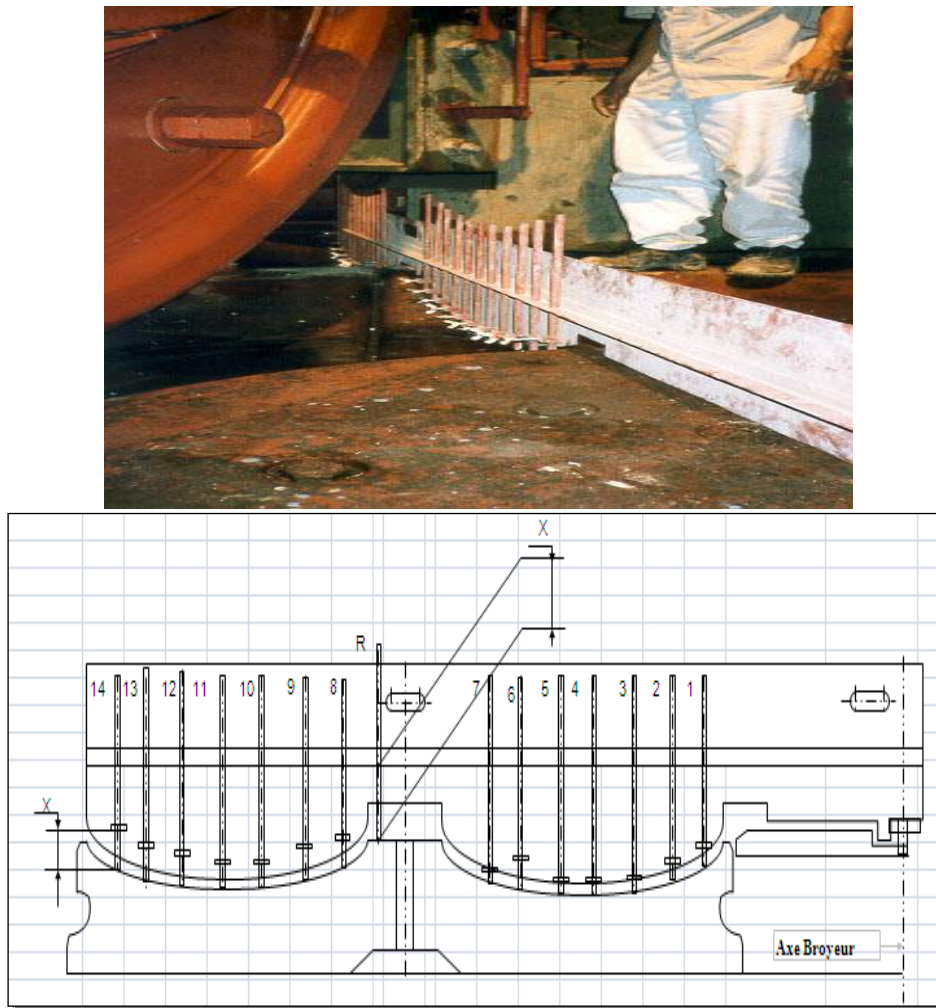


Figure II-19 : Instrumentation et points de mesure sur les pistes du plateau. [1]

II-10 - 8 Ajustage de l'anneau de retenu :

Afin de garder une quantité de matière favorable sur le plateau pendant le broyage, le plateau est muni d'un anneau de retenu à hauteur ajustable. L'utilité de cet anneau réside dans sa position en extrémité jouant le rôle d'un obstacle contre le débordement du cru sous l'effet de la force centrifuge. L'anneau est constitué de portions en arc de cercle pouvant être boulonnées.

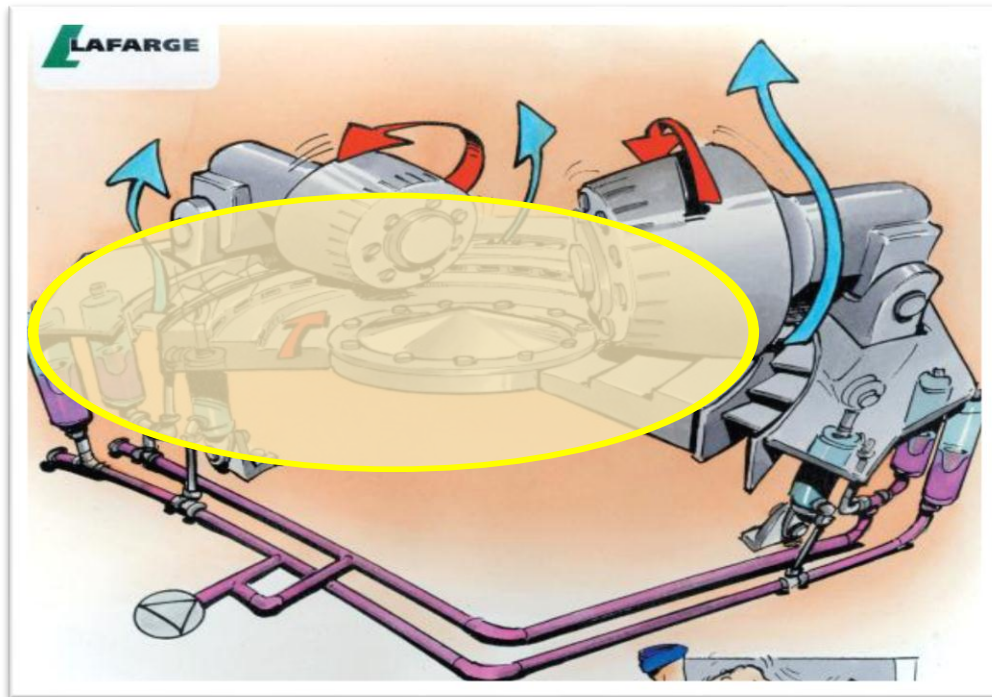


Figure II-20 : L'anneau de retenu. [1]

Pratiquement, la hauteur de l'anneau est choisie par le service "procédés" à cause de son impact direct sur le débit du broyeur. En effet, c'est en fonction de l'usure des galets et des pistes qu'on ajuste cette hauteur : plus l'usure est élevée, plus on diminue la hauteur de l'anneau de retenu.

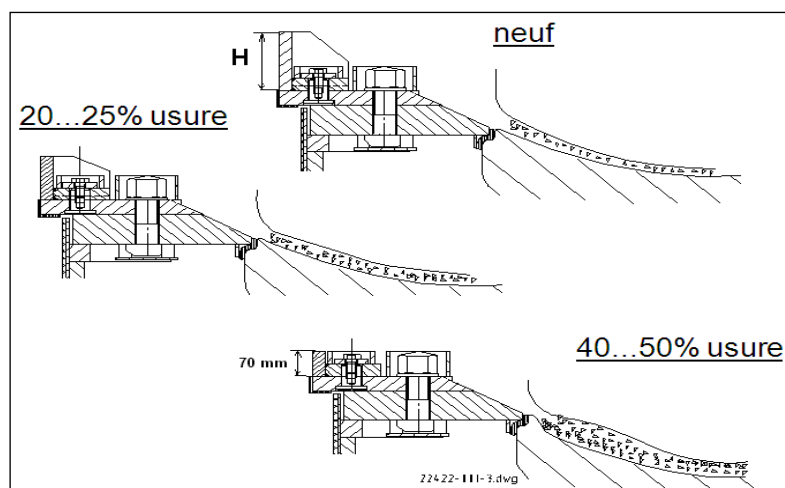


Figure II-21 : Condition d'ajustage de l'anneau de retenu. [2]

Une hauteur inconvenable de l'anneau influence sur la quantité de la matière sur le plateau et par la suite les conditions de broyage. L'excès ou le manque du cru génère de la vibration. Ainsi, si la hauteur de l'anneau est exagérée ou rétrécie, on décèlera systématiquement son impact sur le niveau vibratoire. Actuellement, la hauteur adoptée est de 70mm, qui est d'ailleurs la hauteur minimale. Cette valeur est figée, ce qui est actuellement convenable à l'état d'usure de l'ensemble galets et pistes, mais il sera demandé de l'augmenter dans le cas de changement de galets. [2]

II-10-9 L'anneau de soufflage (ou de ventilation)

Communique au flux gazeux ascendant un mouvement qui lui permet de prélever la matière sur la table et de l'entraîner vers le séparateur. Les grains les plus grossiers vont retomber sur l'assiette par décantation, les autres seront sélectionnés dans le séparateur.

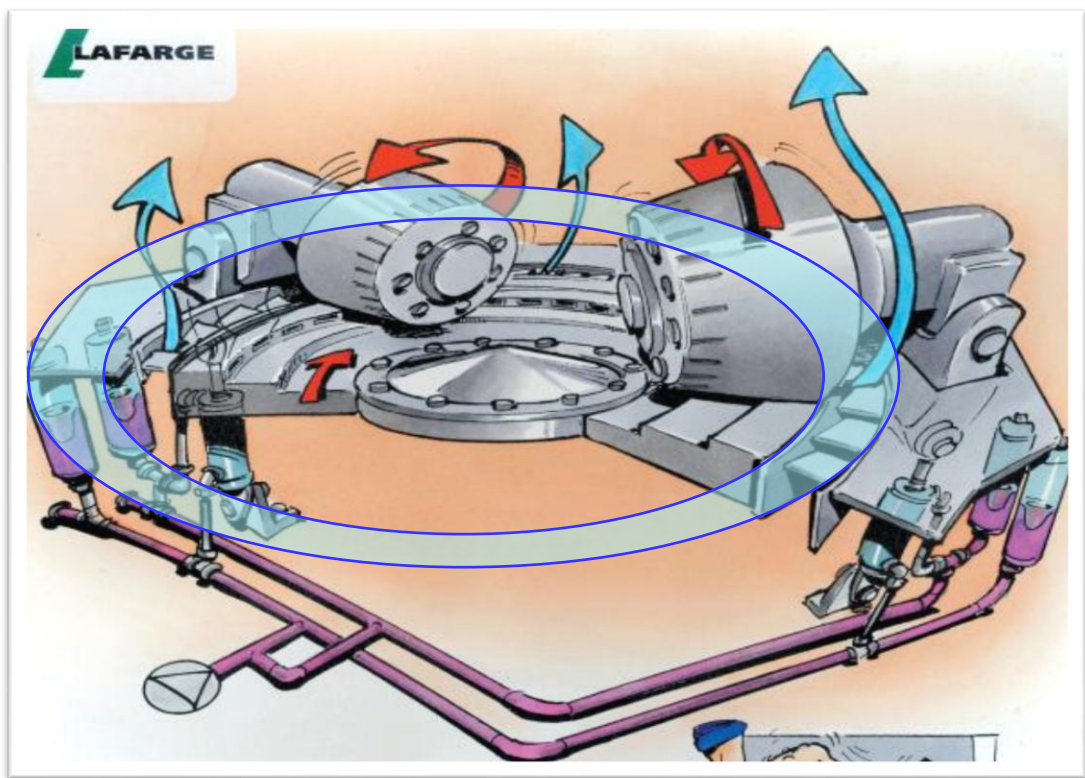


Figure II-22 :L'anneau de soufflage [1]

II-11 Le mécanisme de l'endommagement et de la fissuration par fatigue :

II-11-1 Effet de la concentration des contraintes :

Les conditions de fonctionnement du bandage ont un impact primordial sur l'état du matériau. La vibration permanente sur l'ensemble du broyeur, en particulier l'ensemble plateau-galets, implique une grande contrainte de compression et de frottement également, l'étude effectuée sur l'usure du bandage a montré que le contact galet/matière ne s'effectue pas au centre de la piste, ce qui a créé un déséquilibre d'usure le long de la largeur du galet.

En effet, la modification du profil des galets (voir figure II-23), crée des obstacles contre le passage de la matière. Le cru circulant sera donc piégé partiellement, et c'est à cause de sa position en amont du parcours de la matière non broyée, qu'il est le plus influencé par l'impact de la granulométrie relativement grande. [2]

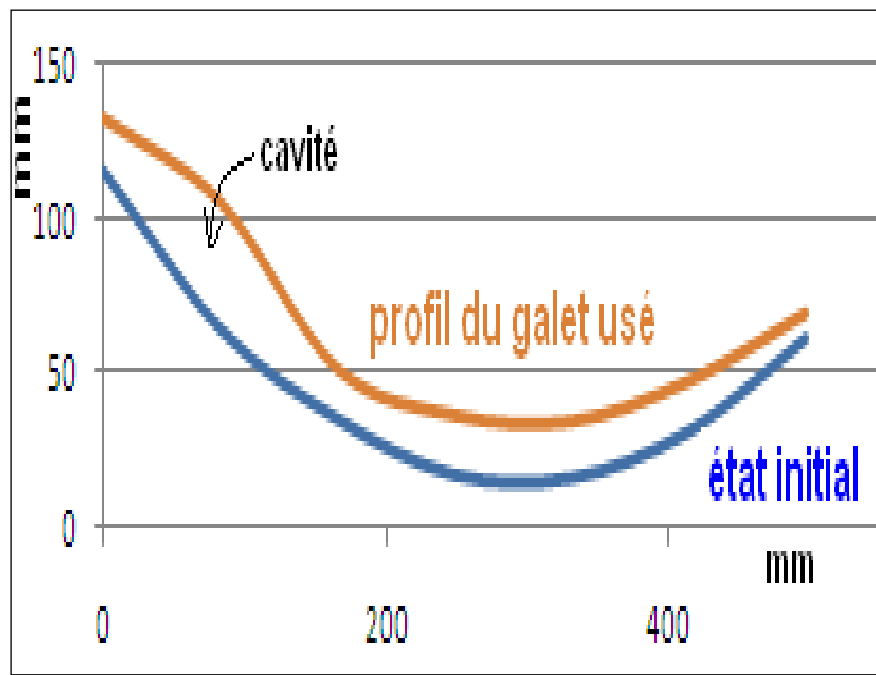


Figure II-23 : Modification géométrique du profil causée par l'usure du bandage. [2]

On constate donc que la combinaison de ces facteurs constitue la cause directe de la concentration des contraintes au niveau de certains points sur la largeur du bandage, notamment au niveau des changements de section causé par le déséquilibre de l'usure (lieu de la cavité).

II-12 Stade de propagation des fissures :

La propagation de la fissure de fatigue pendant ce stade se fait suivant ce mécanisme : Fissuration en présence d'une atmosphère réactive (oxydation) avec formation de stries à chaque cycle par suite l'irréversibilité des glissements

II-12-1 Principe physique :

La fatigue du bandage sous l'action des contraintes cycliques peut être parmi les causes de rupture en service. L'origine de la rupture est une fissuration progressive qui s'est étendue jusqu'à ce que la section transversale restante ne puisse plus supporter l'effort appliqué, ce qui conduit à une rupture brutale en supposant que la fissure n'est accompagnée par aucune modification de forme ou d'aspect de la pièce endommagée.

L'inconvénient devant le contrôle des fissures réside dans la détection précoce. La possession d'un outillage de contrôle est donc incontournable pour déterminer l'endroit de l'apparition et par la suite pouvoir suivre la dégradation.

Pour le cas de la fatigue à grand nombre des heures, quand la contrainte est inférieure à la limite de rupture, la majeure partie de la durée de vie de la pièce est le temps nécessaire pour initier une fissure. Une fois initiée la fissure se propage à cause de la concentration de contraintes à la profondeur. [1]

II-12-2 Impact de la dureté :

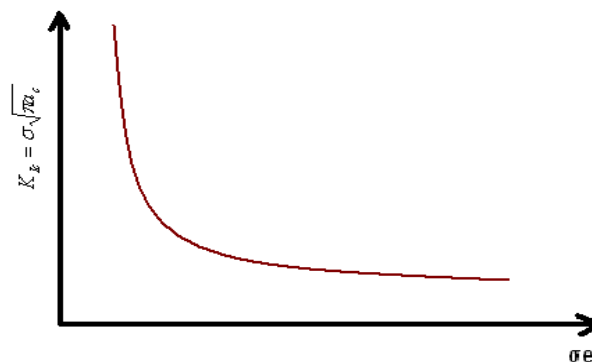


Figure II - 24 : relation entre la dureté et résistance à la rupture. [7]

Remarque :

Plus un matériau n'est dur, plus faible est la résistance à la rupture.

II-12-3 Etude de l'effet corrosif :

Il s'agit ici de production d'une corrosion localisée sous forme de fissuration, due à la présence de contraintes mécaniques de tension.

Elle est remarquée plus particulièrement dans les métaux à grande résistance mécanique et dans ceux de type inoxydable. Elle se produit sous l'action conjointe d'un milieu agressif spécifique et d'une contrainte mécanique, celle-ci accélère considérablement l'action du milieu, Souvent l'action du milieu, à elle seule, serait insuffisante pour provoquer une corrosion dommageable, alors que, si elle est liée à une action mécanique, elle peut devenir dangereuse.

Les ions de chlore, en présence de la vapeur d'eau à haute température ainsi que les oxydes de carbone et de soufre en flux gazeux, jouent un rôle important. Il est à remarquer que toutes les opérations de travail du bandage donnent des tensions, de même que la couche surfacique passive peut être en compression ou en extension. Le bandage subit aussi des contraintes d'origine thermique à cause du gradient de température entre l'air circulant dans le broyeur, utilisé pour séchage, et l'eau versée sur la matière provenant de l'extérieur à la température ambiante.

On peut aussi bien voir apparaître les effets de corrosion sous tension au bout d'un temps très court qu'au bout de quelques années, et c'est à ce niveau où se manifeste le danger de ce phénomène. [2]

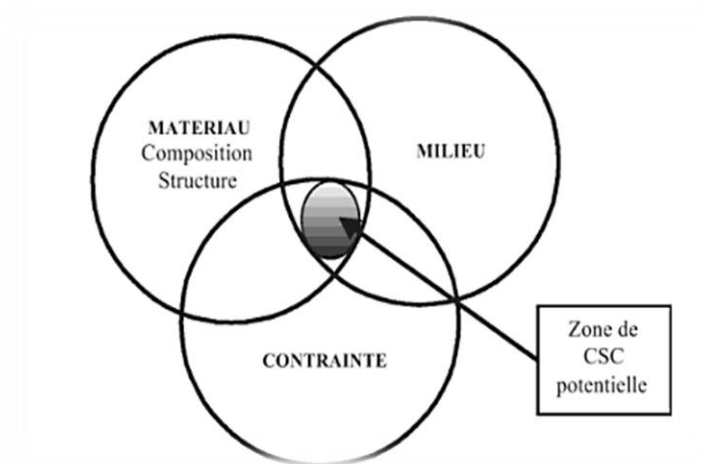


Figure II-25 : Diagramme de VEN regroupant les paramètres à l'origine de la CSC. [5]

Le CSC n'est pas un processus inévitable, pour la plupart des métaux et dans la plupart des environnements il ne se produira pas. Le milieu de fonctionnement et le métal utilisé constitue une combinaison susceptible de favoriser la défaillance

II-12-4 Emission des gaz réducteurs au niveau du four :

Le flux de gaz entrant dans la cellule de broyage provient des émissions du four à travers la tour d'homogénéisation, ces émissions sont composées essentiellement des oxydes de carbone (CO et CO_2) et d'autres gaz notamment SO_3 , CH_4 et N_2O . L'émission de CO_2 est le résultat de la décarbonatation à l'étape du pré calcination.

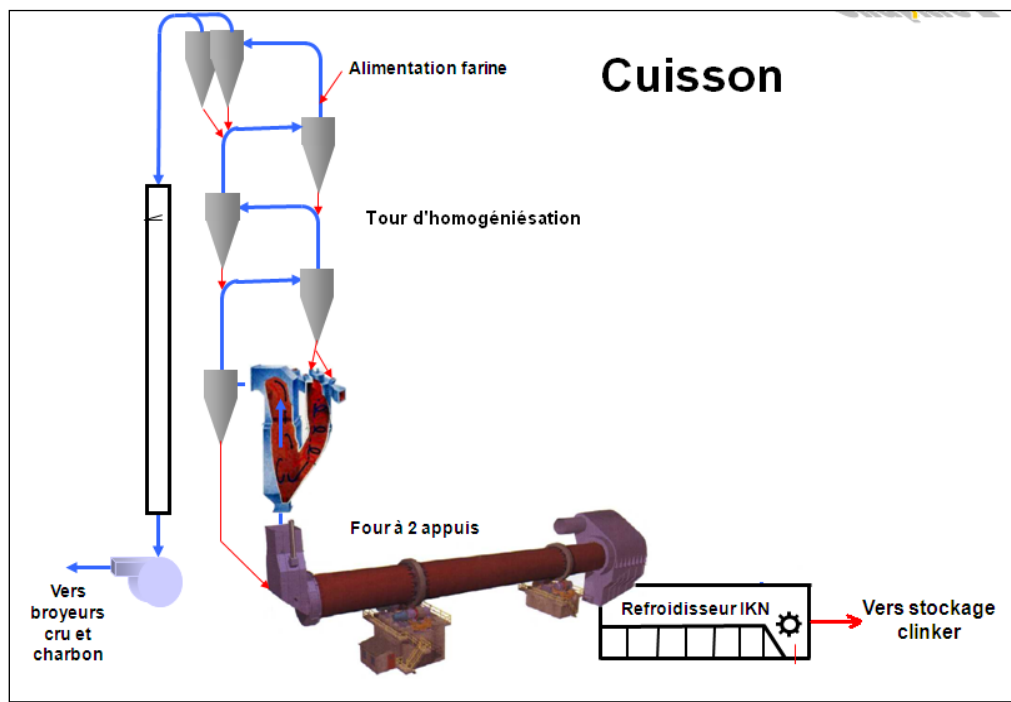
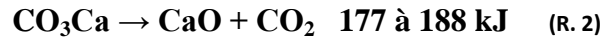


Figure II-26 : Circuit des émissions gazeuses à travers le tour d'homogénéisation. [1]

En effet, le rôle de la tour est de préparer la matière pour la cuisson. Grâce aux gaz du four soufflés à haute température, deux opérations essentielles sont effectuées avant l'introduction de la matière à l'intérieur du four rotatif :

- L'évaporation de l'eau : à l'état libre, l'eau s'évapore à 100°C , et de 250° à 450° on a des déshydrations de l'eau de liaison.
- Décarbonations de la farine : Il s'agit d'une réaction endothermique visant à éliminer le

carbone du carbonate de magnésium (MgCO_3) et du carbonate de calcium (CaCO_3) dont l'expression est la suivante :



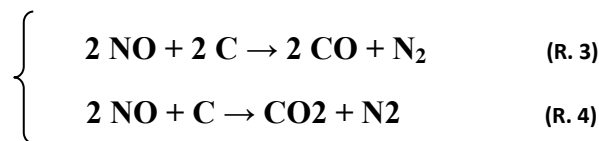
Les gaz formés, qui sont chargés en oxydes de carbones et en vapeur d'eau, sont alors récupérés au niveau des cyclones puis transportés en passant par un ventilateur vers les broyeurs cru , avec une température qui atteint à l'entrée de ces derniers 270°C . [4]

Impact des gaz du four

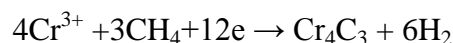
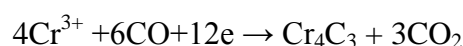
A l'intérieur du broyeur, le flux gazeux s'introduit à grande vitesse par l'anneau de buse, l'étanchéité de la cellule de broyage est primordiale, les airs faux déséquilibrent la dépression voulue, fixée dans les environs de -58mbar . Ainsi, les émissions provenant du four dominent toute l'atmosphère intérieure.

En l'occurrence, l'humidité et la teneur en dioxyde de carbone a une influence directe sur le matériau. En effet, si on localise l'étude sur la fissure en question, on constate qu'elle cache en profondeur un milieu favorable pour la dégradation corrosive.

Le monoxyde de carbone apparaît dans le mélange gazeux à l'issue d'une combustion incomplète ou bien à cause de la réduction du dioxyde du carbone ou encore à cause de l'inflammation du combustible composé de l'azote N_2 . l'azote subit immédiatement une oxydation par l'oxygène pour donner naissance à l'oxyde d'azote NO , par la suite, une partie de NO est réduite par le carbone de fuel selon les réactions suivantes: [4]



En présence du monoxyde de carbone ou d'hydrocarbures ou plus généralement d'espèces carbonées, l'alliage inoxydable du bandage peut être carburé selon des réactions de type :



(R. 5)

Selon les travaux de plusieurs chercheurs, les piqures sont dues à une précipitation de carbures (Cr_4C_3). Cette précipitation entraîne un appauvrissement en chrome de la matrice au voisinage des carbures qui conduisent à la dépassivation de ces zones. [4]

II-14 Recommandation général :

II-14-1 Le Critères du choix meilleur système de revêtement :

- ✓ Types et stratégies de maintenance (prévisionnelle ou corrective)
- ✓ Résistance à l'usure et épaisseur du revêtement
- ✓ Propriétés mécaniques du revêtement (pression, impact, température)
- ✓ Résistance à la corrosion
- ✓ Position de la surface à revêtir
- ✓ Chaleur apportée lors du revêtement
- ✓ Nécessité de préchauffer et d'effectuer un traitement ultérieur
- ✓ Pas de démontage, donc économie de temps
- ✓ Coûts globaux
- ✓ Maintenabilité du revêtement

II-15 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons effectué description et compose essentiellement de broyeur étudié une enquête préliminaire qui nous a permis de connaître le fonctionnement du broyeur, et de détecter les différents facteurs agissant sur le broyeur pendant son fonctionnement. Ensuite, pour pouvoir cerner l'origine de l'avarie étudiée, on a traité toutes les causes susceptibles de provoquer la fissure sur le Bandage.

Après avoir analysé les différentes causes, nous avons présenté les solutions qui pourront augmenter la résistance du bandage à la fatigue, à la corrosion, et recommander des suivis nécessaires pour diminuer les vibrations au sein du broyeur Dans le chapitre suivant, on traitera les solutions pour lesquelles ont opté.