

14/90

وزارة التعليم العالي  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

1EX

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : METALLURGIE

PROJET DE FIN D'ETUDES

**SUJET**

**ETUDE DES CAUSES D'USURE  
DES ROUES DE LOCOMOTIVES**

Proposé par :

**CRF / SNTF**

Etudié par :

**K. Younsi**

Dirigé par :

**S. Abdi**



- DEDICACES -

C'était à :

- Ma famille,
- Mes amis,
- A tous ceux qui me sont chers,

que je voulais dédier ce modeste travail.

K. YOUNSI .

V- CAUSES PROBABLES D'USURE.....38

V-1- Etude statistique comparative de l'usure des roues  
de locomotives.....38

V-2- Analyse du phénomène d'usure.....38

V-2-1- Analyse de la composition chimique.....38

V-2-2- Aspect structural.....39

V-2-3- Dureté Brinnel.....43

V-2-4- Essai d'usure.....45

V-2-5- Analyse des causes probables d'usure.....49

V-2-6- Solutions envisagées.....50

CONCLUSION.....53

...../.....

# Introduction

## I. INTRODUCTION

Le present mémoire se propose de faire une expertise sur les avaries des roues de locomotive.

L'avarie la plus fréquente c'est l'usure. Pour cette raison, on a jugé nécessaire de mener une enquête afin de déterminer les causes probables d'usure de la roue et par conséquent d'améliorer ses caractéristiques métallurgiques afin d'augmenter la durée de son fonctionnement.

Pour cela, notre travail a été divisé en quatre parties:

- La première partie concerne à définir l'usure, son intérêt, de mentionner les types fondamentaux d'usure, les classes d'usure et les facteurs influençants l'usure ainsi que les méthodes de mesure du taux d'usure.
- La deuxième partie est consacrée aux traitements thermiques des pièces qui travaillent à l'usure.
- La troisième partie étudie la méthode de fabrication, traitement thermique et contrôle de qualité des roues.
- La quatrième partie qui est la plus importante (la partie expérimentale) concerne la recherche des causes probables d'usure et les solutions envisagées pour lutter contre cette avarie.

# Partie I

## II. DEFINITION DE L'USURE

On définit l'usure comme étant la perte progressive de matière de la surface active d'un corps par suite du mouvement relatif d'un autre corps sur cette surface .

En général, on entend par le terme usure , la détérioration d'un corps par suite de l'usage qu'on en fait .

Ces définitions révèlent toutes les deux la permanence et l'universalité du phénomène d'usure.

C'est un phénomène permanent car, tout au long de l'histoire des techniques l'homme s'est toujours préoccupé d'augmenter par un choix convenable du matériau , la durée de vie des dispositifs qu'il fabriquait .

Il est universel car l'usure se produisant inévitablement lorsque deux corps en contact glissent l'un sur l'autre .

### II- 1. INTERET DE L'ETUDE D'USURE

Double intérêt :

#### II-1-1 INTERET ECONOMIQUE

L'usure est la principale cause de la mise hors service des organes et des machines . car plus on diminue les effets du problème de contact de deux surfaces , on arrive à économiser annuellement des sommes considérables .

#### II-1-2 INTERET SCIENTIFIQUE

Notre civilisation scientifique exige une connaissance approfondie des mécanismes fondamentaux responsables de l'endommagement des surfaces ou des pièces qui travaillent à l'usure et cela vu l'augmentation des pressions de contact, des vitesses de glissement, et des durées de fonctionnement .

Les programmes de tribologie qui comportent plusieurs disciplines scientifiques; mécanique des solides , des fluides , physique du solide chimie ect . . . . ont pour objet d'apporter aux ingénieurs et techniciens des données leur permettant d'améliorer les dispositifs existants ou d'en construire de nouveaux .

Pourtant, malgré toutes les recherches très poussées dans ce domaine, le remède est complexe, les solutions sont maues connues vu la multiplicité des facteurs influençants l'usure tels que :

La métallurgie des pièces et de leurs traitements de surfaces, de leurs tolérances de fabrication, des conditions d'utilisation et en particulier de leur degré de conformité avec celles prévues par le constructeur, des conditions d'environnement climatiques telles que : La température , l'humidité de l'air, l'abrasivité de l'atmosphère (poussières), de faillance de graissage : gripage, abrasion , piquage, rayage, écaillage .....

## II-2 CLASSEMENT D'USURE

Dans la pratique suivant le problème en présence duquel on se trouve , on considère les détériorations de surfaces sous les angles différents . on estime qu'il existe trois classes d'usure .

### II-2-1 USURE BENIFIQUE

Elle se nomme aussi "usure de rodage " , son importance décroît dans le temps et conduit à un meilleur état de surface ce qui permet un meilleur fonctionnement des organes.

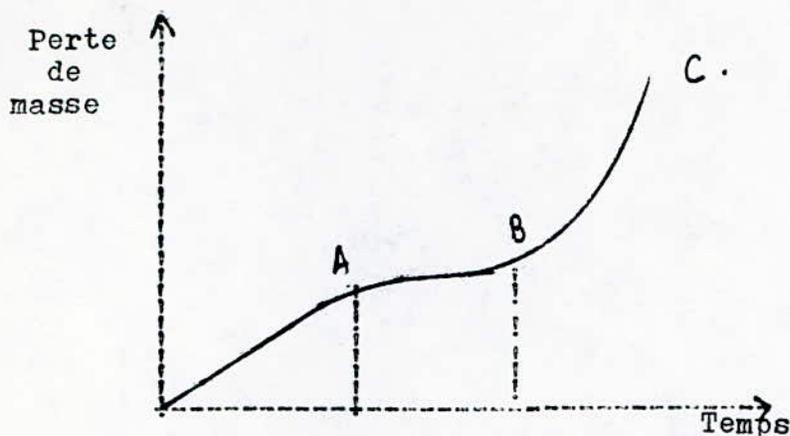
### II-2-2 USURE NORMALE

C'est une usure très lente , elle conduit au vieillissement de la machine.

### II-2-3 USURE CATASTROPHIQUE

C'est la plus néfaste, elle conduit à la destruction rapide et complète des surfaces et même par fois à la destruction de l'organe en question .

L'allure de la courbe(1) nous illustre bien la perte de masse en fonction du temps ainsi que les trois classes d'usure .



COURBE 1

### II-3 METHODES DE MESURE DU TAUX D'USURE

Les pertes de masses peuvent être déterminées à partir des méthodes suivantes :

#### II-3-1 METHODE OPTIQUE

À l'œil seulement, évaluation sommaire des dégâts subits, soit directement sur la surface, soit sur des répliques en matière plastique.

#### II-3-2 METHODES MECANIKES

Un palpeur, la fine aiguille d'un profilomètre se déplace sur la surface, son déplacement est amplifié de 20 à 100 fois et l'on peut ainsi détailler de façon précise le nombre et l'importance des aspérités, leur forme, le contour moyen de la surface, son évolution au cours de l'essai.

#### II-3-3 METHODES DIVERSES

Pesée de l'échantillon avant et après frottement, cette phase est nécessaire pour connaître la perte de poids au cours de l'essai, c'est à dire l'enlèvement de matière lors du processus.

## II-4 LES FACTEURS DE L'USURE ET EFFETS OBSERVABLES

Les études sur le phénomène d'usure, font en général intervenir un grand nombre de paramètres, de modes d'observations et de processus physiques.

### II-4-1 LES PARAMETRES DONT LE CHOIX DEFINIT LES CONDITIONS INITIALES D'UTILISATION TELLES QUE :

- Le mode de contact (linéaire, surfacique ou ponctuel)
- L'état de surface microgéométrique .

En réalité du fait de la nature physique des différents procédés d'usinage les pièces réelles présentent, par rapport à leur forme idéale des défauts géométriques et l'une des conséquences de l'existence des observations géométriques est que l'aire de contact réelle  $A_R$  n'est souvent qu'une faible fraction de l'aire apparente de contact  $A_a$  .

#### -CHARGE

Appliquée avant ou après le début du glissement, elle peut garder pendant une expérience constante ou varier de façon progressive .  
une valeur

#### -LA VITESSE

Pendant le glissement à sec, la vitesse influence surtout sur la température superficielles en contact, ce qui conduit à :

- Undégagement de chaleur
- Déteioration de la couche d'oxyde

Si la vitesse de déplacement est faible :

- Le film d'oxyde a le temps de se former, l'usure est faible.
- Si la vitesse de déplacement est élevée /

La température s'élève, le film d'oxyde n'a pas le temps de se former, il y'aura contact métal sur métal, l'usure est importante .

## AMBIANCE

Nous entendons par ce terme la nature <sup>du</sup> milieu, ainsi que les conditions de pressions et de températures .

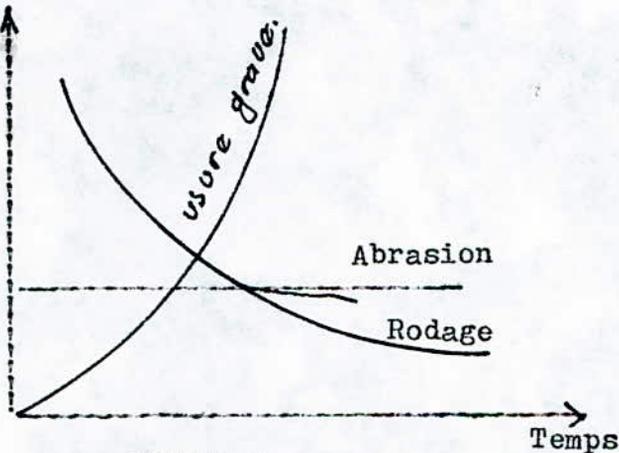
## NATURE DES METAUX

Il s'agit de la composition chimique, de la structure métallurgique et des propriétés mécaniques des métaux et alliages et plus particulièrement des couches superficielles .

## TEMPS DE FONCTIONNEMENT

La courbe de ux 2 montre l'influence du temps sur le taux d'usure.

quantité de matière enlevée par unité de temps.



COURBE 2

- Pendant le rodage l'usure est légère, diminue avec le temps.
- Dans l'usure par abrasion, la quantité de matière arrachée est constante au cours du temps .
- Dans l'usure grave, la quantité enlevée est une fonction exponentielle du temps .

## II-4-2 LES MODES ET EFFETS OBSERVABLES

Les modes ou les effets les plus fréquents observés pendant la détérioration d'une surface sont :

- Les vibrations
- Les phénomènes thermiques
- Transformation géométrique
- variation de masse

### II-4-3 LES MECANISMES D'USURE

Les processus physiques ou mécanismes mis en jeu dans la détérioration des surfaces sont:

- L'adhésion
- L'abrasion
- L'érosion
- La fatigue
- La déformation
- Combinaisons de tout ou partie de ses processus

### II-4-4 TYPES FONDAMENTAUX D'USURE

- Usure adhésive Par contact métal-métal, microsoudures, cisaillement des jonctions par frottement et transfert métallique.
- Usure abrasive Rayage d'une surface par des aspérités dures ou par des particules véhiculées par un fluide .
- Usure par fatigue Enlèvement de particules détachées par fatigue mécanique superficielle produite par accumulation de contraintes cycliques.
- Usure corrosive Attaque chimique suivie par enlèvement des produits de réaction par action mécanique (frottement)

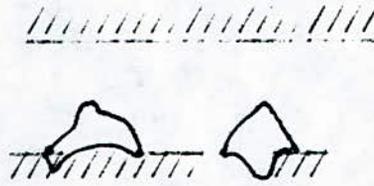
### TYPES SECONDAIRES D'USURE

- Corrosion de contact Enlèvement de matière entre deux surfaces des soumises à des vibrations mécaniques.
- Formations cavités par implosion (éclatement) de bulles de gaz ou de vapeurs incluses dans un fluide .

Où encastrées dans l'une des surfaces, et on aura une abrasion à deux corps .



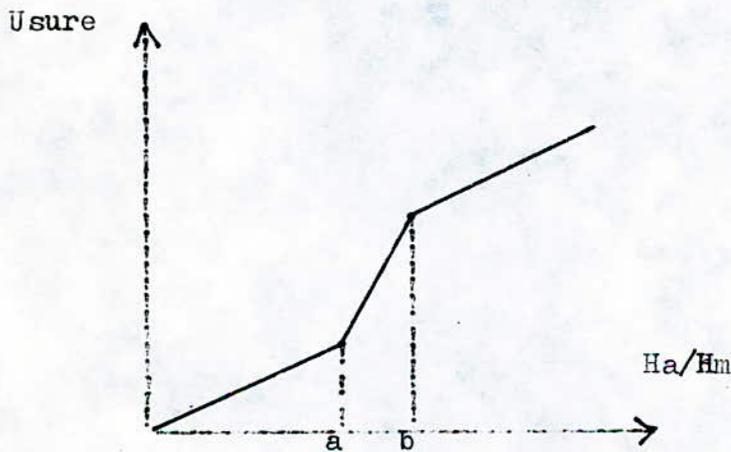
Abrasion à 3 corps



abrasion à 2 corps

### FACTEUR INFLUANT L'ABRASION

- 1)- Parametre dynamique de la sollicitation d'abrasion : caracterisée par la charge, la pression ainsi que par les vitesses relatives des surfaces et des particules abrasives .
- 2)- Dureté de l'abrasif : Cette caracteristique détermine l'aptitude physique d'un grain abrasif à rayer un matériau plus tendre .



Ha: Dureté de l'abrasif

Hm: Dureté du materiau

### 3)- FORME ET GRANULOMETRIE (DIMENSIONS) DE L'ABRASIF

La forme ou la dimension du grain a une influence evidente sur son agressivité .

#### REMARQUE

Une forme particulière d'usure abrasive

L'usure erosive est une forme d'usure abrasive due au contact avec un fluide en mouvement relatif (huile, eau, air ..... ) contenant des particules solides très dures et et très fines (exemple) le grenailage ou le sablage .

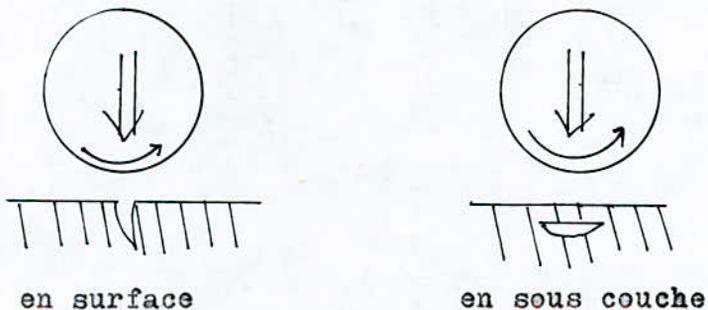
### II-4-4-3 USURE PAR FATIGUE.

La fatigue des surfaces est introduite essentiellement par le frottement de roulement ou de roulement-glissement sous fortes charges répétées.

La manifestation de la fatigue mécanique superficielle est l'apparition de petites criques ou cavités à la surface du métal. Ce type de détérioration se nomme le PIQUAGE (PITTING).

EN profondeur, les fissures se propagent à quelques dixièmes de millimètres (0,2 à 0,3mm) de la surface.

Les fissures superficielles peuvent également se produire et affectent surtout les surfaces soumises à un mouvement de glissement pur, à vitesse élevée, aussi bien en frottement sec qu'en frottement lubrifié. Ces fissures sont d'origine thermiques, ils sont soit en sous couche, soit à la surface.



#### Les facteurs influants l'usure par fatigue:

L'origine de la fatigue n'est pas uniquement liée à l'état des contraintes mécaniques mais aussi à d'autres facteurs tels que:

##### 1) Les tensions internes résiduelles:

Dues aux traitements thermiques, ainsi les aciers cimentés donnent de l'écailage qui se produit sous la couche carburée.

## 2)- LES RUGOROSITES DE SURFACE

Les rugosités constituent des amorces de fissures par effet d'entaille bien connu dans les essais de fatigue .

## 3) L'HOMOGENEITE DU METAL PRES DE LA SURFACE

La présence d'inclusions, de défaut de moulage ou de forgeage , constituent l'amorce des fessures .

## II-4-4-4 USURE CORROSIVE

Elle se définit comme un processus dominé par une réaction chimique ou électrochimique avec le milieu environnant .

Les métaux ferreux, qui sont les importants au point de vue industriel, sont très facilement attaqués .

La corrosion qui résulte de ce phénomène est une source de perte pour l'industrie, le matériel détérioré doit être soit remplacé soit remis en état .

### 6- STADES DE L'USURE CORROSIVE

Dans un premier stade les surfaces sont attaquées chimiquement par des agents corrosifs contenus dans l'ambiance ou formes dans le lubrifiants par altération .

La vitesse est initialement rapide puis diminue dans le temps avec la formation d'un film cohérent plus ou moins protecteur formé par (d'oxyde métallique , de sels organiques, de sulfure chlorures etc...) puis garde une vitesse constante .

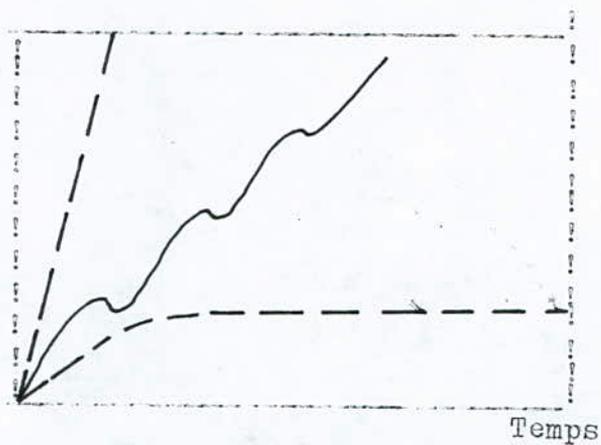
Un second stade consiste en l'enlèvement par frottement des produits de réactions des surfaces .

Dans la plus part des cas, les produits de corrosions sont plus durs et plus fragiles que les surfaces qui lui ont donné naissance .

Le film formé résistera à l'usure tant qu'il sera de très faible épaisseur . Lorsqu'il atteindra une épaisseur critique , le frottement entraîne un arrachement par ecailage ; d'où le nom usure .

La variation du taux d'usure en fonction du temps représentée sur la courbe ci après :

Taux  
d'usure  
corrosive



- ABSENCE DE FILM PROTECTEUR
- USURE
- FORMATION D'UN FILM PROTECTEUR COHERENT

# Partie II

# Partie II

### III) TRAITEMENTS SUPERFICIELS

#### III-1 INTRODUCTION

Les traitements superficiels des aciers ont pour but l'obtention d'une dureté élevée en surface jointe à une tenacité et une ductilité importante au cœur.

La structure est alors macroscopiquement ~~hétérogène~~ et est constituée d'un véritable matériau composite présentant une âme résiliente et une zone superficielle de grande dureté avec augmentation simultanée de la résistance à l'usure et dans beaucoup de cas de la limite d'endurance aux sollicitations cycliques (fatigue).

On peut obtenir ce résultat de diverses manières correspondant à des traitements industriels très utilisés pour certains, d'entre eux .

a) - MODIFICATION d'une zone superficielle par traitement thermique localisé .

- Durcissement par trempe après chauffage superficiel .

b) - MODIFICATION d'une zone superficielle par traitement thermo-chimique de diffusion d'un élément d'alliage par contact avec un milieu adapté :

- Nitruration : Diffusion d'Azote .

- Sulfonitruration : Diffusion simultanée d'Azote et de Soufre .

- Chromisation : Diffusion de chrome

- Boruration : Diffusion de bore .

- Sherardisation : Diffusion de zinc .

c -) MODIFICATION d'une zone superficielle par diffusion d'un ou plusieurs éléments suivie d'un traitement thermique affectant la zone modifiée.

-CEMENTATION: Diffusion du carbone suivie d'un durcissement par trempe .

-CARBONITRURATION : Diffusion simultanée d'azote et de carbone suivie d'un durcissement par trempe .

-Dans tous les cas précédents, le résultat est une modification de la constitution physico-chimique d'une zone superficielle de faible épaisseur (quelques dizaines de micromètres à quelques millimètres) tout en préservant les propriétés de la zone centrale .

### III- 2) TRAITEMENT DE DURCISSEMENT APRES CHAUFFAGE SUPERFICIEL

#### III-2-1) PRINCIPE ET BUT:

Il a pour but l'obtention d'une structure martensitique dans une couche superficielle de quelques millimètres d'épaisseur. Pour cela, il faut porter rapidement cette couche à la température d'austénitisation ( $A_{c3}$ ) ; Le refroidissement se fait au bout d'un temps très court d'austénitisation : Il faut éviter le transfert thermique par conduction vers l'intérieur de la pièce .

#### III-2-2) TECHNIQUES UTILISEES

Elle se différencie essentiellement par le mode d'apport de l'énergie thermique dans la zone superficielle .

### III-2-2-1 CHAUFFAGE PAR INDUCTION

Un générateur de tension haute fréquence (quelques KHZ à quelques centaines de KHZ) alimente un solénoïde qui constitue le primaire d'un transformateur dont le secondaire est la pièce à traiter .

- L'apport thermique dans la zone superficielle est du :
- Aux pertes par hysteresis magnétique tant que l'acier est ferro-magnétique ( A2) .
- A l'effet joule lié à l'existence de courants induits .

La zone efficace où circulent les courants est limitée à une épaisseur donnée par la relation de Kelvin .

$$\delta = 1,6 \sqrt{\frac{\rho}{\mu_r f}}$$

$\delta$  : épaisseur en mm

$\rho$  : résistivité électrique en  $\mu\Omega$  cm

$\mu_r$  : perméabilité magnétique relative

f : fréquence en KHZ

Cette valeur de  $\delta$  ne donne pas l'épaisseur réelle austénitisée ; Il faut tenir compte de la diffusion thermique au cours du chauffage

Pratiquement pour augmenter la pénétration, on peut diminuer la puissance et augmenter le temps du chauffage .

#### EXEMPLE:

Pièce en XC48, longueur 25mm , diamètre , 15 mm

P (KW)	6	9	12
t(s)	9	5	2,5
e trempée(mm)	2,7	2,0	0,5

Deux méthodes de trempe sont utilisées suivant les dimensions et la forme des parties à traiter .

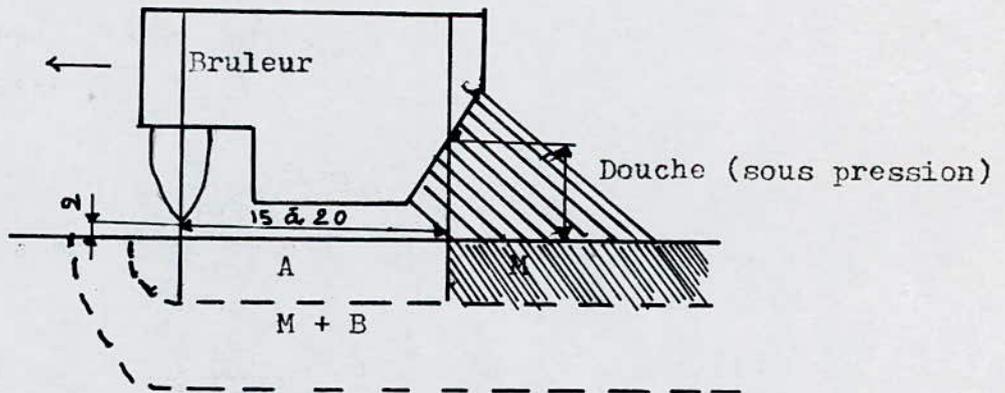
- Trempe générale instantanée .
- Trempe de proche en proche ou au défilé .

### III-2-2-2 CHAUFFAGE AU CHALUMEAU

Les flammes O<sub>2</sub>- propane, O<sub>2</sub>-acetylene, O<sub>2</sub>-tétrène permettent un apport thermique suffisamment rapide , conduisant à des chauffages élevés (200° C-S<sup>-1</sup> par exemple) .

Les memes méthodes de trempe qu'en chauffage inductif sont utilisables- la figure(1) montre l'exemple d'un montage pour trempe au défilé .

FIGURE (1)



### CHAUFFAGE AU CHALUMEAU - TREMPÉ AU DEFILÉ

### III-2-3 ACIERS UTILISES

L'austenitisation et la trempe n'interessant qu'une tres faible epaisseur, il est inutile de faire appel à des nuances de trempabilité elevée.

On emploie donc des aciers non allies ou faiblement allies dont les teneurs en carbone sont inferieures à 0,5% en general. Une teneur plus importante favoriserait les tapures de trempe et des taux d'austenite residuelle trop elevés tendant à diminuer la durezza.

Le durcissement par trempe superficielle permet l'emploi de nuances de faible cout et entraine de faibles deformations des pièces.

Cependant les nuances utilisées doivent presenter des garanties particulieres d'homogeneité de composition, des teneurs limitées en S, P, NI, Mo, Cu, un grain fin est relativement peu sensible au grossissement.

### III-3 DURCISSEMENT PAR TREMPE APRES CEMENTATION

#### III-3-1 PRINCIPE ET BUT

La cementation est un traitement thermechimique de diffusion ayant pour but l'enrichissement en carbone d'une couche superficielle de la pièce à traiter.

Cet enrichissement se fait par la mise en contact avec un milieu carburant.

L'operation de diffusion est toujours suivie d'une operation de trempe afin d'obtenir le durcissement de la couche enrichie par formation de martensite.

### III-3-2 L'ETAPE D'ENRICHISSEMENT EN CARBONE

Deux phénomènes en fait interviennent simultanément :

- Une réaction chimique qui fournit du carbone à la surface du métal .
- Un processus de diffusion de l'élément carbone dans la zone superficielle de la surface vers l'intérieur. (loi gazeuse classique)

### III-3-3 TYPES DE CEMENTS UTILISES

On utilise trois types de ciments :

- Ciment pulvérulent ou pâteux : Cimentation solide
- Ciment liquide ; Cimentation liquide
- Ciment gazeux : Cimentation gazeuse.

NB: La cementation gazeuse est la mieux connue et adaptée parfaitement aux productions industrielles en série .

### III-3-4 ACIER DE CEMENTATION

Les nuances d'aciers utilisées pour la cementation sont des aciers pour traitement thermique non alliés ou alliés de teneur en carbone inférieure ou égale à 0,2% les teneurs atteintes en surfaces varient selon les applications de 0,7 à 1,2% en général .

### III- 4 NITRURATION

La nitruration conduit à l'obtention d'un durcissement superficiel par diffusion d'azote en général sans traitement thermique consécutif .

## III-6 AUTRES TRAITEMENTS SUPERFICIELS

### III-6-1 SULFONITRURATION

Diffusion simultanée de soufre, d'azote et de carbone obtenue par immersion de la pièce dans un bain de sels fondus. La sulfonituration est applicable en fait à tous les alliages ferreux.

Exemple d'applications glissières, paliers, guides arbres....

### III-6-2 CHROMATISATION

Diffusion de chrome en milieu pulverulent à une température supérieure à AC3

Deux types de chromisation sont utilisés .

a) CHROMATISATION DOUCE (ou brillante): appliquée aux aciers à basse teneur en carbone, doux et extradoux. Ce traitement confère à l'acier une résistance à la corrosion remarquable, l'acier pouvant subir des emboutissages et des plages sans dommage .

b) CHROMATISATION DURE: appliquée aux aciers à haute teneur en carbone ( 0,3%) en particulier à des aciers à outils, elle conduit à la formation d'une couche compacte et adhérente de carbures M7 C3 les duretés peuvent atteindre 1600 à 2000 HV

Exemple d'application : limes, fraises dentaires, outils de formage, d'emboutissage ....etc....

### III-6-3 BORURATION

Diffusion de bore en milieu pulverulent à une température supérieure à AC3 .

L'enrichissement en bore permet d'obtenir des borures de fer de type Fe<sub>2</sub>B ou Fe<sub>3</sub>B de duretés exceptionnellement élevées (2100 Hv).

Exemples d'emploi : Guide-fils, vis transporteuses de matières abrasives glissières , etc.....

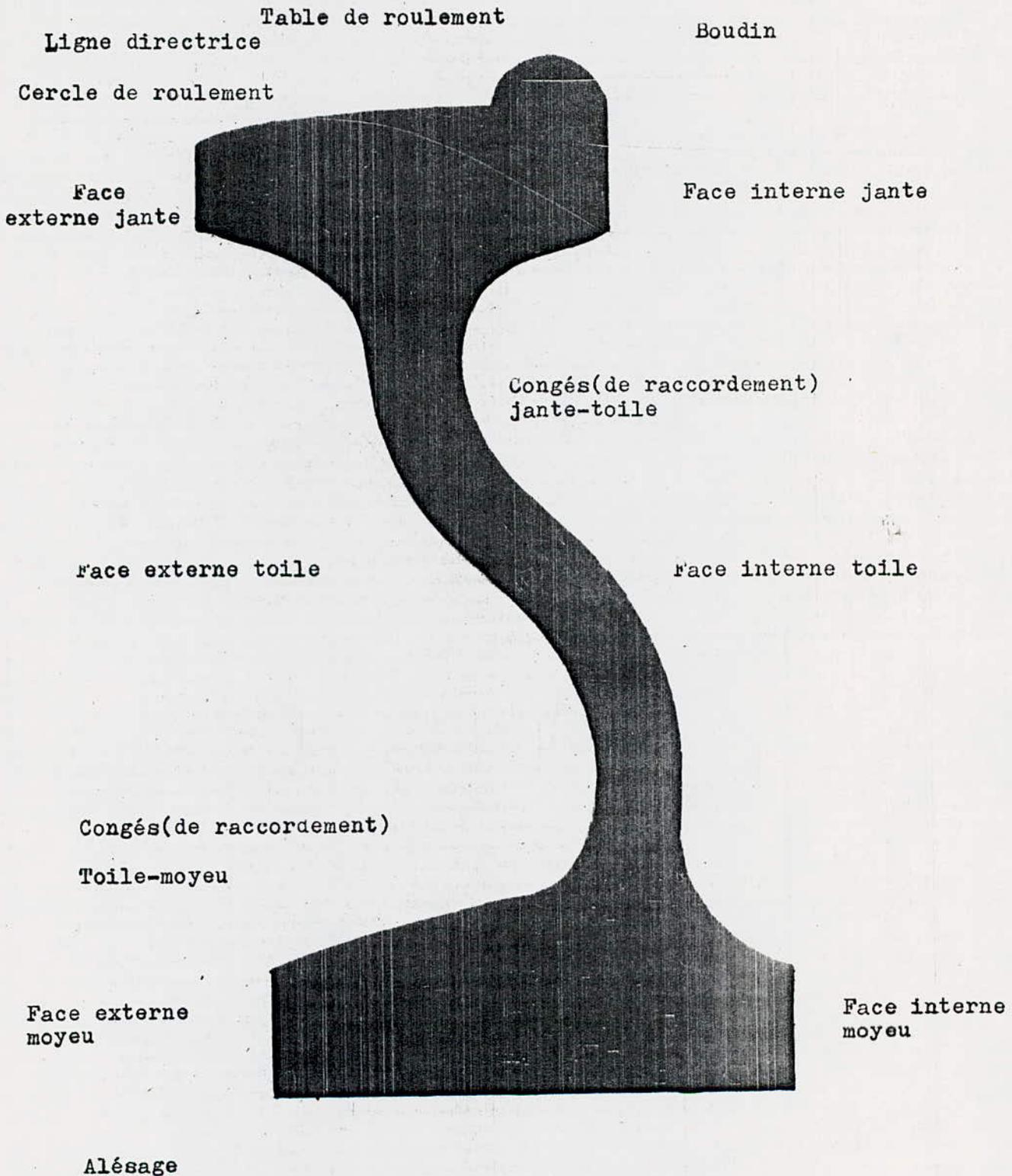
Dans le domaine des aciers à outils , la bôuration est intéressante de fait de la grande résistance à l'abrasion et à l'usure qu'elle confère au métal .

### III-6-4 AUTRES REVELLEMENT

Destinés à augmenter la dureté superficielle et la résistance à l'usure . Des revêtements d'oxydes, carbures, nitrures de Ti, W, Cr..... sont obtenus par des procédés chimiques CVD (chemical vapour deposition).

# Partie III

# TERMINOLOGIE



## IV) DESCRIPTION GENERALE DE LA FABRICATION DES ROUES

### IV-1 LA COULEE DE L'ACIER

- l'acier est élaboré selon des procédés modernes très performants:
- Un four électrique UHP (ultra haute puissance) de 80t qui fait la fusion .
  - Un affinage en poche chauffant qui homogénéise le bain et réalise la mise à nuance .
  - Un dégazage sous vide type R.H

Les poches d'aciers peuvent indifféremment passer par la voie coulee continue rotative après passage au stand de dégazage.

#### IV-1-1 VOIE lingot

Tous les lingots sont coulés en source; méthode unanimement reconnue pour obtenir une grande propreté inclusionnaire.

Les lingots sont cylindrique d'un diamètre de 480 mm.

#### IV-1-2 VOIE COULEE ROTATIVE

La machine produit des barres de diamètre 290 à 325 mm pour la fabrication des roues .

#### IV-1-3 CONTROLE

Les moyens les plus avancés sont mis en oeuvre pour suivre la progression de l'élaboration, depuis l'échantillonnage (suivant des méthodes nouvelles) jusqu'au spectromètre à décharge lumineuse capable de doser 22 éléments en passant par les analyseurs capables de déterminer les teneurs en C et S par mesure en infrarouge en moins d'une minute.

Les analyseurs d'oxygène d'azote et d'hydrogène font partie de l'arsenal normal du laboratoire de l'usine et ces éléments sont couramment dosés au même titre que le carbone, le manganèse et l'aluminium.

## IV-2 LA PREPARATION DES BLOCS

Les lingots sont livrés à l'atelier de tronçonnage ou ils sont découpés en blocs à l'aide de tours outils multiples capables de 40 lingots par poste. Les longueurs des blocs varient avec le poids des roues et on laisse subsister un noyau de 80 mm de diamètre pour manutentionner l'ensemble plus aisément .

Les blocs n'étant séparés qu'au début de la rampe d'accès au four tournant.

Les barres de coulée continue sont seiés sur une série circulaire à lame en carbure qui, compte tenu de l'excellente régularité du diamètre, fournit un bloc dont les tolérances de poids sont très serrées .

## IV-3 FORGEAGE DES ROUES

### IV-3-1-CHAUFFAGE

Cette phase est l'une des plus importantes car elle conditionne pour une part la qualité des roues, les facteurs à maîtriser sont:

#### a)-LA PROGRESSIVITE

LES aciers pour roues sont généralement une teneur en  $\sigma$  supérieur à 0,40% . Ils sont donc sensible à la ~~temp~~ temp.

#### b)-L'HOMOGENEITE

Chaque bloc doit être à la température optimale dans toute sa masse si l'on veut, d'une part que l'écrasement à la presse se fasse uniformément , d'autre part que les ébauches arrivent au laminoir dans des conditions aussi identiques que possibles.

#### c)-LE REGIAGE DE LA COMBUSTION

Il doit permettre d'obtenir un état de surface d'autant plus parfait que la toile des roues reste généralement brute. La calamine doit être aussi réduite que possible et  $\sigma$  peu adhérente.

#### d) LA REGULARITE DES CADENCES DE DEFOURNEMENT

Elle conditionne les trois facteurs ci-dessus et un manque de régularité a des conséquences inevitables sur la qualité. Le four à sole tournante s'est confirmé être l'outil idéal.

-Le chauffage est reparti en 05 zones .

- 1) 01 zone sans bruleur.
- 2) 01 zone de préchauffage.
- 3) 02 zones de plein feu.
- 4) 01 zone d'égalisation.

-Energie de chauffage:Gaz naturel.

-Diametre moyen:15m

-Largeur de la sole:04m

-Capacité de chauffage:35t/heure

-Vitesse de rotation:1 tour/6 heures

-Contenance:420 blocs.

#### IV-3-2 LE DECALAMINAGE

Au sortir du four, le bloc est présenté à la decalamineuse sous pression d'eau à 300 bars qui élimine l'oxyde des faces superieures et inferieures.

Les incrustations de calamine entre les deux "tas" ébaucheurs doivent être évitées. La calamine laterale tombe d'elle meme au premier coup de presse , elle est évacuée par un jet d'air comprimé.

#### IV-LE FORGEAGE

a) Cette operation , dont les différentes phases vont être décrites, se fait avec une presse hydraulique de force 6000t. comme cette presse a été spécialement conçue pour le forgeage des couches de roues , sa levée n'exède pas 1,500m et elle est très rapide.

Un simple écrasement à la presse entre deux matrices ne permet pas de réaliser une pièce aussi compliquée, aux épaisseurs maxi variables qu'une roue.

La presse en plusieurs opérations ébauche la forme de la roue. Elle donne, au lapin de départ, l'allure d'une roue trapue ou l'on distingue les trois parties : moyeu, toile, jante.

#### b) LA PRESSE A PERÇER

D'une force de 400t, réalise le perçage qui permettra le passage de l'axe lors du laminage.

#### c) LE LAMINOIR

L'ébauche sortant de la presse est transportée au laminoir. Elle est maintenue par un axe passant à travers le trou percé dans le moyeu.

Elle est soumise à l'action de cinq galets :

- Un galet arrière dit "refouleur" donnant la forme du boudin et du roulement
- Deux galets verticaux qui laminent la toile et entraînant la roue dans son mouvement de rotation.

#### d) LA PRESSE A ONDULER

A la sortie du laminoir, la roue a ses dimensions mais sa toile est droite.

La presse de 5000t, munie de matrices, sert à mettre en forme et en position définitive les différentes parties de la roue.

Chaque roue reçoit son marquage et subit alors une série de contrôles dimensionnels à chaud. Toute dérive est immédiatement signalée au contre maître de fabrication pour réglage complémentaire.

### IV-3-4 LE REFROIDISSEMENT

Bien que non imposé encore par toutes les spécifications, le dégazage sous vide est généralisé. Néanmoins, des dispositions de refroidissement sont maintenues.

Les roues sont refroidies en palettes sous des tunnels calorifugés pendant 8 heures.

#### IV-3-5) LA ROBOTISATION

Les développements récents de l'informatique industrielle et de la robotique ont conduits à moderniser l'installation en robotisant intégralement les manutentions entre les outils, en effet, six robots à 5 degré de liberté organisent le ballet des ébauches de roues à une cadence de 75 roues/heure quand la chaîne atteint sa pleine puissance .

#### IV-3-6 LE TRAITEMENT THERMIQUE

La quasi-totalité des roues est aujourd'hui traitée thermiquement: jante trempé à l'eau par la surface et revenue de toute la roue. Pour ce faire, 04 opérations en cycle entièrement automatique pour que les roues aient les meilleures caractéristiques mécaniques.

##### IV-3-6-1 AUSTENISATION

Les roues sont chauffées dans un four à sole tournante assurant une montée en température régulière, depuis l'enfournement. Les roues sont alors à la température prescrite 880° C en viron.

##### IV-3-6-2 TREMPÉ

Les roues sont positionnées dans des machines de trempé ou elles sont mises en rotation .Leur bandes de roulement defile alors à une vitesse bien déterminée devant des gicleurs d'eau, disposés à la peripherie (voir photo 1)

La vitesse de rotation des roues, la pression d'eau, la forme et le nombre de gicleurs, la so trempé , ont été étudiées de manière à obtenir les cacteristiques optinales de trempé.

##### IV-3-6-3 REVENUE DÉTENSIVEMENT

Le revenu se fait à une température de l'ordre de 500° C dans un four à sole tournante.

#### IV-3-6-4 LE PARACHEVEMENT ET L'INSPECTION

Dans ce domaine également, une chaîne semi-automatisée a été mise au point:

- Grenailage de declaminage global.
- Examen visuel, marquage.
- Mesure de la dureté par machine automatique.
- Contrôle dimensionnel.

Ces roues sont alors envoyées à l'usinage.

#### IV-4 L'USINAGE

Les roues traitées thermiquement y sont également usinées dans un atelier de grande capacité, sur des machines de haut rendement approvisionnées automatiquement, bénéficiant toutes des techniques les plus récentes de commande numérique :

On doit distinguer deux lignes principales de fabrication:

- Les roues pour matériel remorqué usinées en séries sur des groupes de machines étudiées spécialement.
- Les roues pour matériel moteur remorqué usinées dans une ligne spéciale équipée de machines de haute précision à commande numérique.

LES OPERATIONS SONT GÉNÉRALEMENT LES SUIVANTES:

- a) Tournage sur tours automatiques verticaux à commande numérique. Le tournage se fait en deux opérations correspondant chacune aux deux faces de la roue; côté extérieur et le côté intérieur étant usinés successivement.
- b) Equilibrage
- c) Finition de l'absage et de la gorge de la répartition d'huile.
- d) Percage de trou d'injection.

Les roues sont ensuite envoyées à la presse à caler pour être montées sur les essieux ou expédiées à l'état tel.

#### IV-5 LES DIFFERENTS TYPES DE ROUES

Il y a deux types de roues:

a) Roues monoblocs

b) Roues bandagées

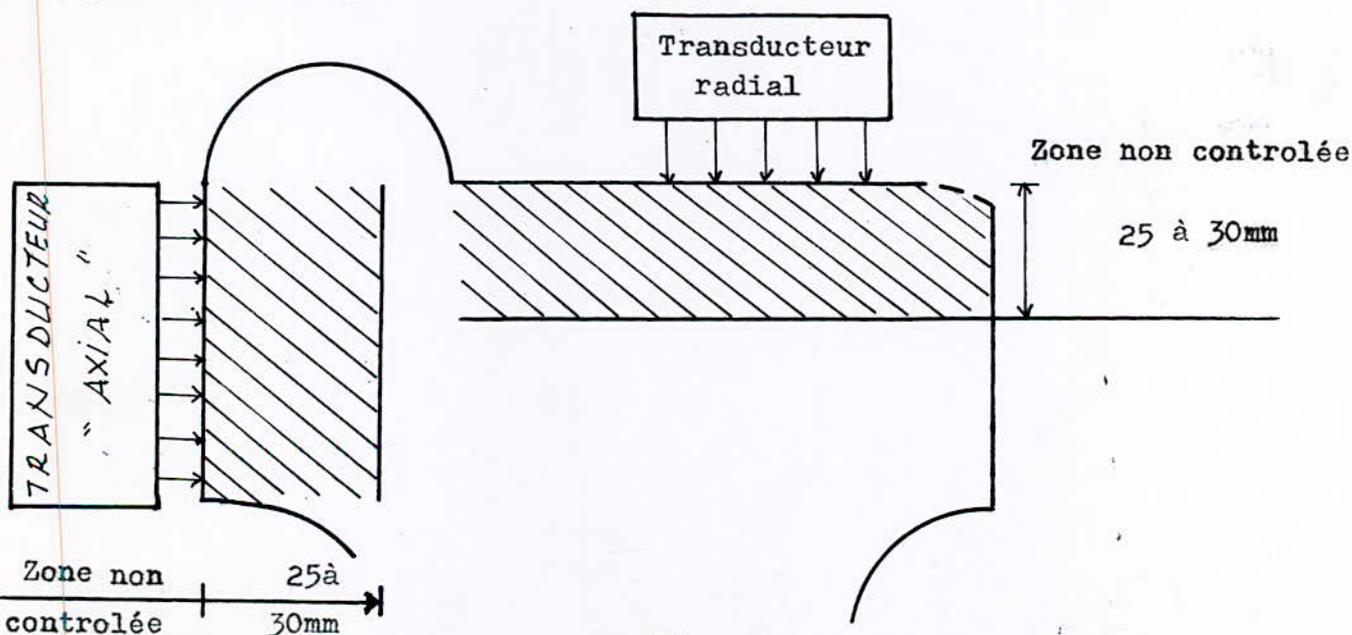
Notre étude est faite sur la roue monobloc de classe "B" selon les spécifications M-107 de l'aar (voir annexe 2).

#### IV-6 LE CONTROLE AU ULTRASONS DES ROUES

Une première étape vers la fabrication de roue de chemin de fer de qualité a été franchie lorsque les fabricants ont équipé leurs ateliers de machines automatiques permettant de sonder aux ultrasons les jantes des roues, aussi bien dans le sens axial que dans le sens radial.

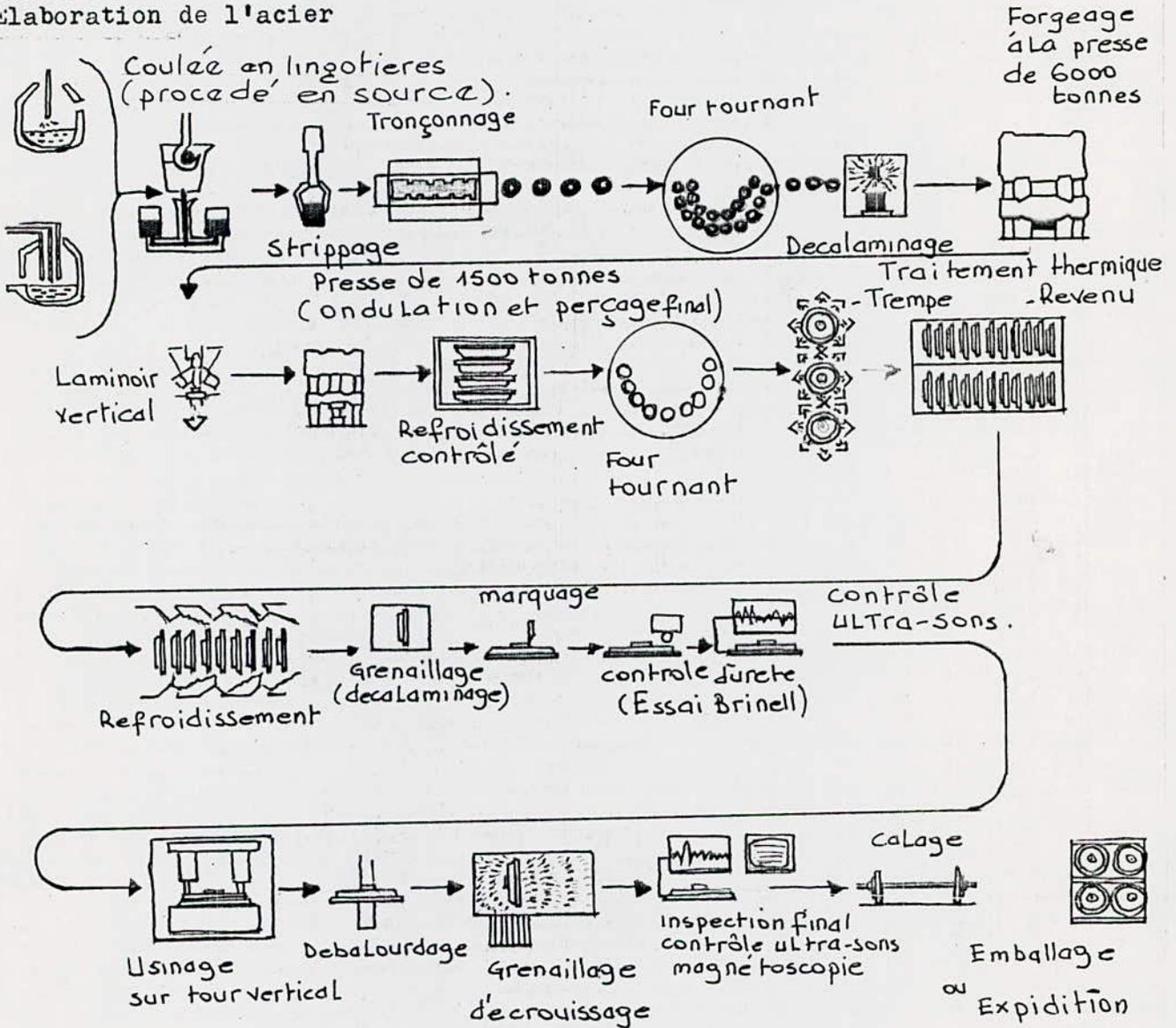
##### LES ULTRASONS POUR LE CONTROLE DES ROUES

Les transducteurs utilisés sont du type à simple céramiques émetteurs/recepteurs, de fréquences 3MHZ et dont la forme est le plus souvent rectangulaire. Le contrôle se fait par immersion totale de la jante qui tourne devant les transducteurs suivant le schéma général représenté sur la figure ci dessous.



Aciérie  
Elaboration de l'acier

Cycle de fabrication des roues



# Partie IV

V. ETUDE STATISTIQUES COMPARATIVES DE L'USURE DES ROUES DE LOCOMOTIVES

L'étude faite sur la durée de vie des roues de locomotives circulant au nord, voie normale (VN), et des roues circulant au sud, voie étroite (VE), a montré que:

La durée entre deux remplacements est de 4 ans et 9 mois c'est à dire (57 mois) pour le premier cas (VN), de 1 an et 11 mois donc (23 mois) pour le deuxième cas (VE).

À la vue de ces résultats, il apparaît que la durée de vie des roues monoblocs des locomotives circulant au nord (VN) est de 2,48 fois plus grande que celles de locomotives circulant au sud (VE).

V-2 ANALYSE DU PHENOMENE D'USURE

V-2-1 ANALYSE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE

D'après la spécification AAR M-107, on utilise pour la fabrication des roues de l'acier classe R7 ou classe "B".

La composition chimique est la suivante:

Carbone C:.....0,57 à 0,67.  
Manganèse Mn:.....0,80 à 0,85  
Phosphore P:.....0,05 Max  
Soufre S:.....0,05 Max.  
Silicium Si:.....0,15 Mini.

L'ANALYSE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE AU SPECTROMETRE A DONNE LES RESULTATS DRESSES DANS LE TABLEAU CI APRES:

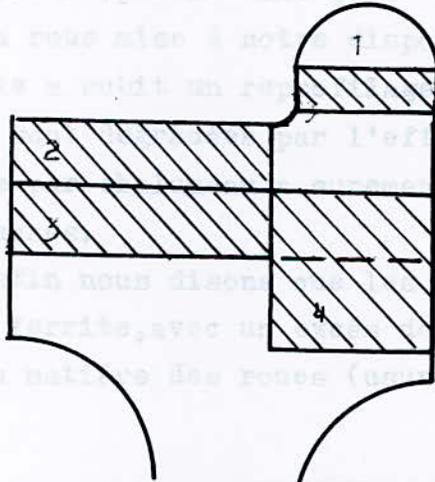
**L'ANALYSE DE COMPOSITION CHIMIQUE AU SPECTROMETRE A DONNE  
LES RESULTATS SUIVANTS:**

C	SI	Mn	S	P	MG	NI	CR	Mo
0,64	0,30	0,797	0,016	0,031	0,004	0,092	0,300	0,022
0,62	0,29	0,744	0,019	0,029	0,005	0,092	0,301	0,021
0,63	0,30	0,740	0,017	0,030	0,005	0,092	0,301	0,021

On remarque que les résultats de l'analyse au spectrometre sont conformes avec ceux de l'AAR-M107.

V-2-2- ASPECT STRUCTURAL

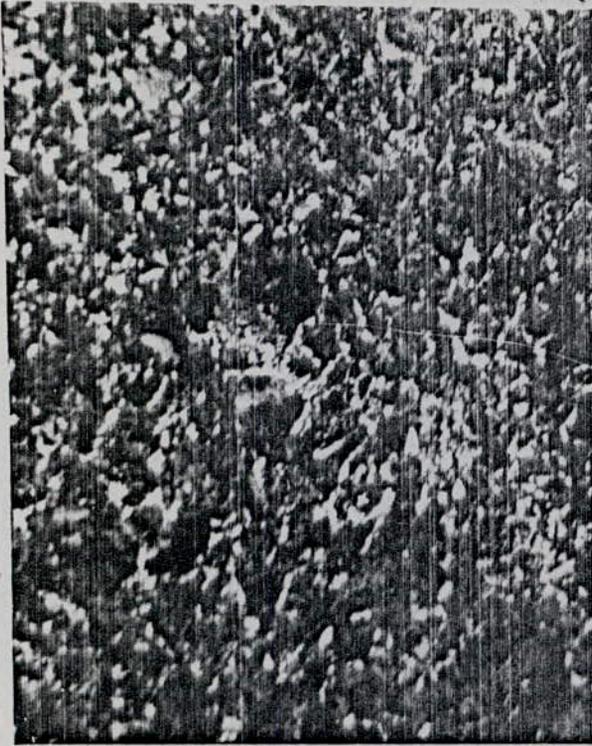
Dessin de la Jante



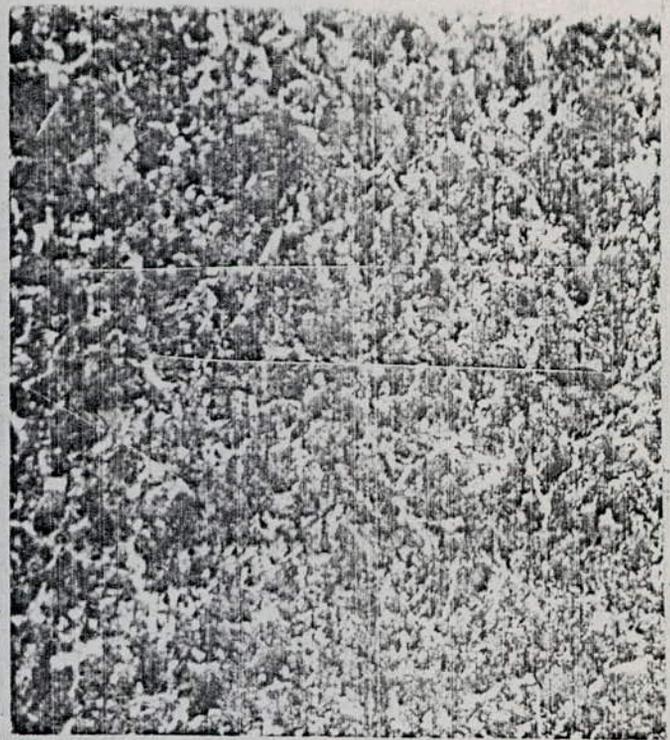
Face externe  
jante

Face interne  
jante

1, 2, 3 et 4 sont les numéros des échantillons



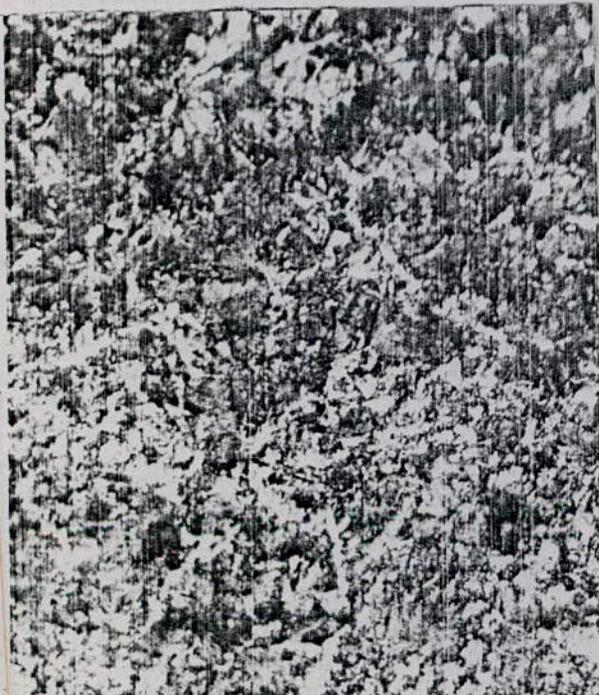
Echantillon 1



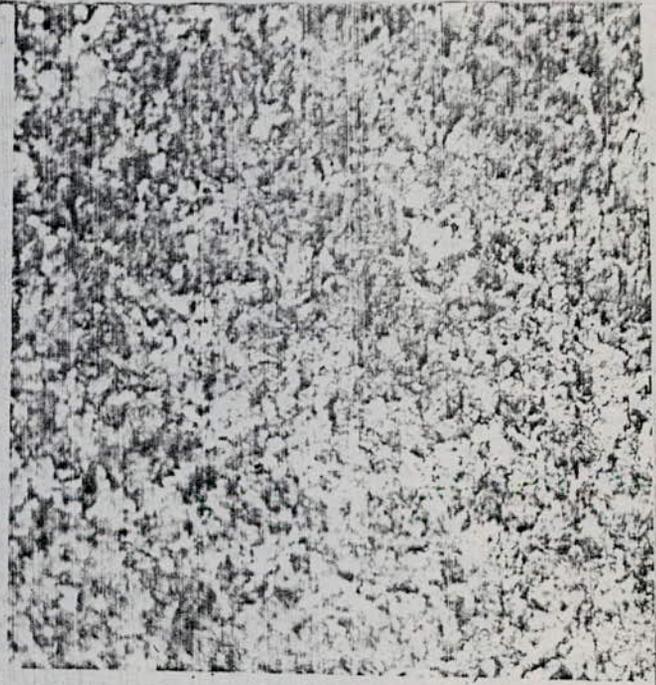
Echantillon 2

G x 250

Echantillon 3

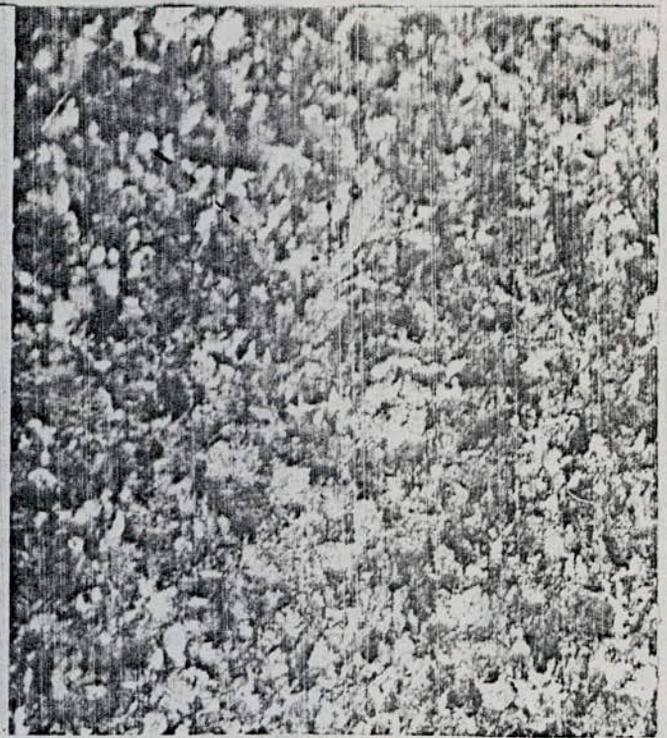


Echantillon 4





Echantillon 1



Echantillon 2

Gx 400

Echantillon 3

Echantillon 4

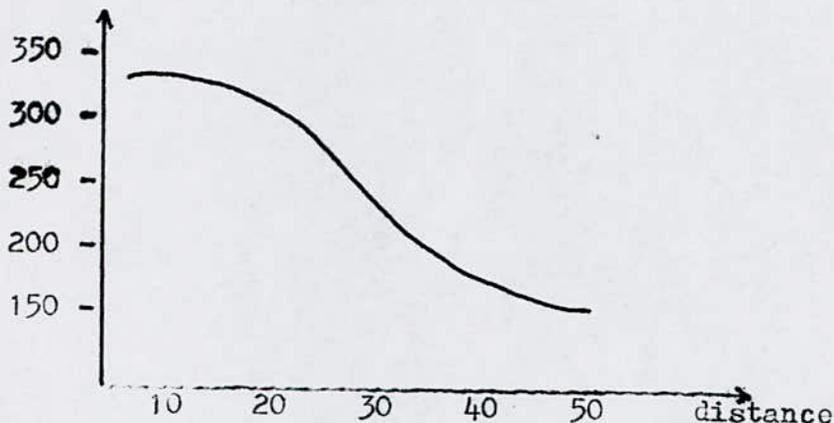


V-2-3 DURETE BRINNEL

Selon la specification AAR M 1071a dureté brinell varie dans l'interval (277 - 341).

La courbe de variation de la dureté HB selon l'axe radial à l'allure suivantes:

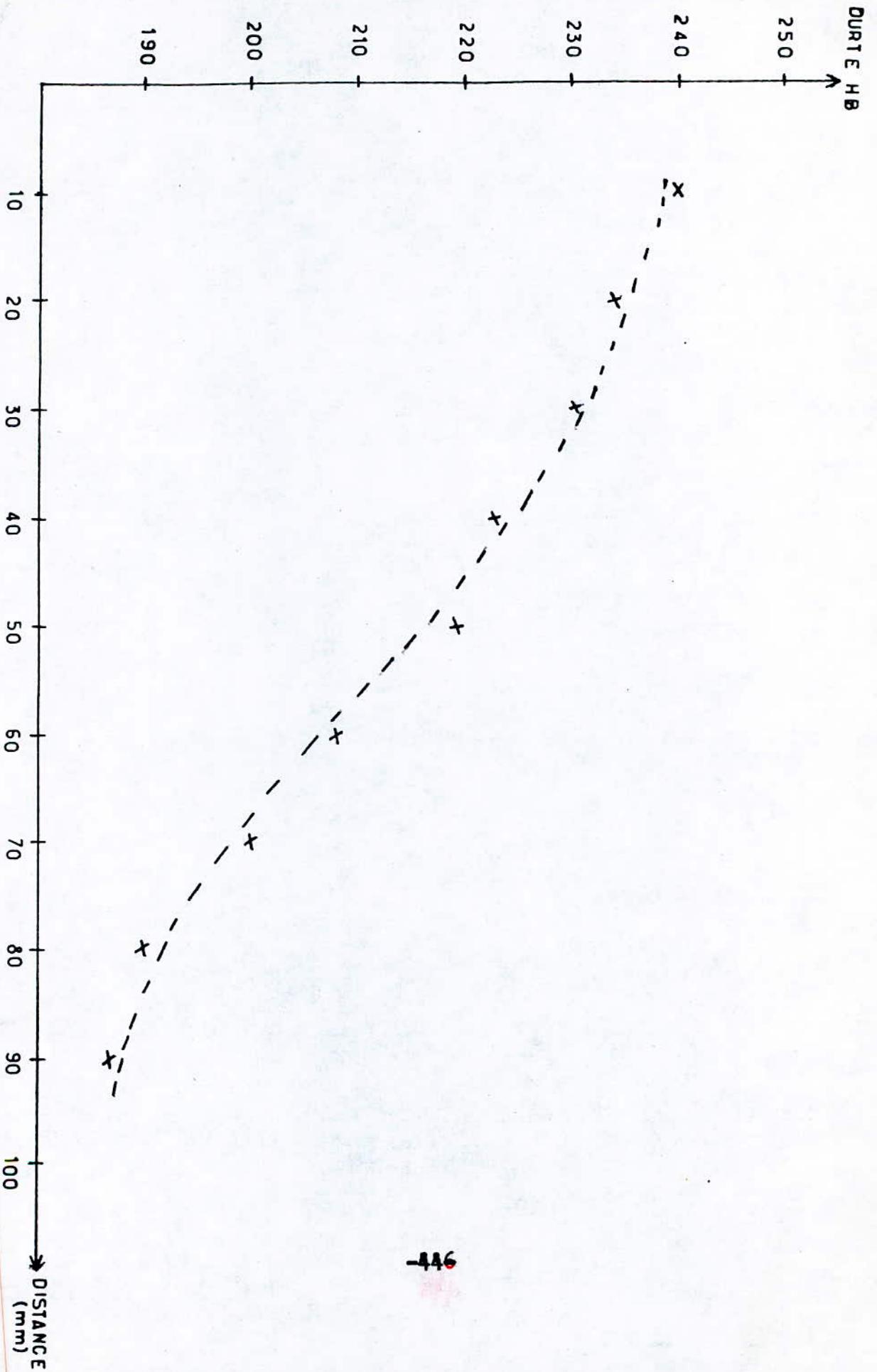
dureté HB



Les resultats pratiques de dureté HB sont donnés dans le tableau ci-aprés.

On a utilisé une bille de 5mm et une charge de 750 KG. les distances entre 2 mesures est de 10mm.

	240	234	230	223	220	208	200	190	187
Dureté (HB)	240	235	231	223	222	208	200	190	187
	240	235	230	223	221	209	200	190	188
Dureté moyenne (HB)	240	234,66	230,33	223	221	208,33	200	190	187,33



## INTERPRETATION DE LA COURBE

On remarque que l'allure de la courbe pratique varie de la même manière que celle donnée par ARR -M 107.

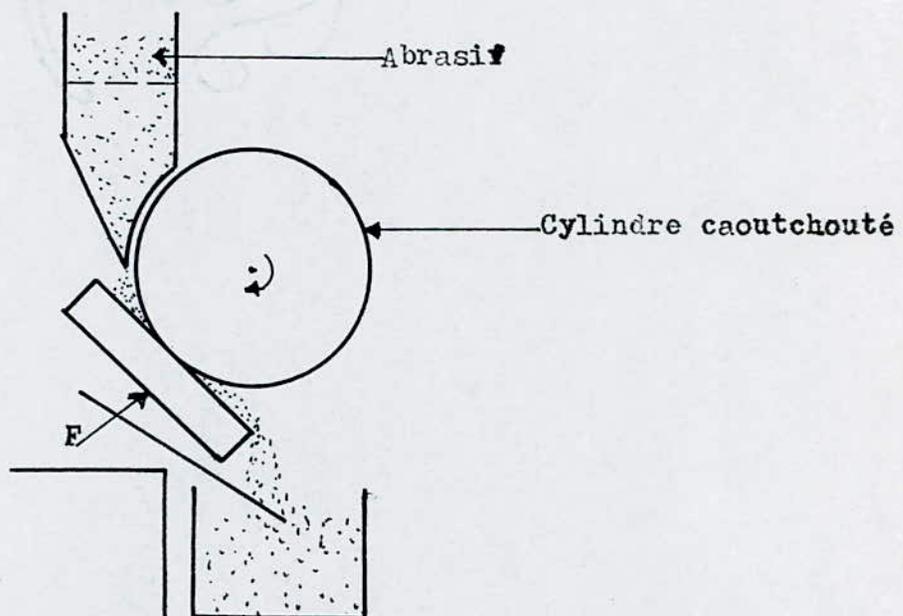
La dureté diminue en allant de la périphérie vers le cœur, et ces valeurs pratiques expliquent bien le fait que les structures trouvées au cœur de notre examen métallographique étaient ferrito perlitiques, ainsi que le grossissement des grains et l'augmentation du pourcentage de ferrite pour les échantillons 3 et 4.

### V-3-4 ESSAI D'USURE

#### V-2-4-1 SCHEMA ET PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

L'organe essentiel de la machine d'usure est le cylindre caoutchouté soumis à une rotation. Grâce à une charge P l'échantillon entre en contact avec le cylindre. Entre les deux surfaces en contact il y a écoulement de la matière abrasive qui provoque l'usure.

#### SCHEMA DE FONCTIONNEMENT



caractéristiques de l'abrasif utilisé dans l'essai:

Nom: carbure de silicium

composition chimique ( voir annexe)

V-2-4-2 CALCUL D'USURE:

L'usure peut être évaluée de manières différentes:

- 1° La quantité de matière perdue par unité de distance parcourue.
- 2° La quantité de matière perdue par unité de temps.
- 3° La quantité de matière perdue par tour ou oscillation.

Les résultats sont donnés sous forme de:

masse, volume, ou épaisseur.

Dans notre essai, la perte de matière est évaluée en fonction du temps, en utilisant différentes charges.

V-2-4-3 EPROUVETTE D'USURE.

Les éprouvettes utilisées ont les dimensions suivantes:

- Longueur 25mm
- Largeur 10mm
- Epaisseur 10mm

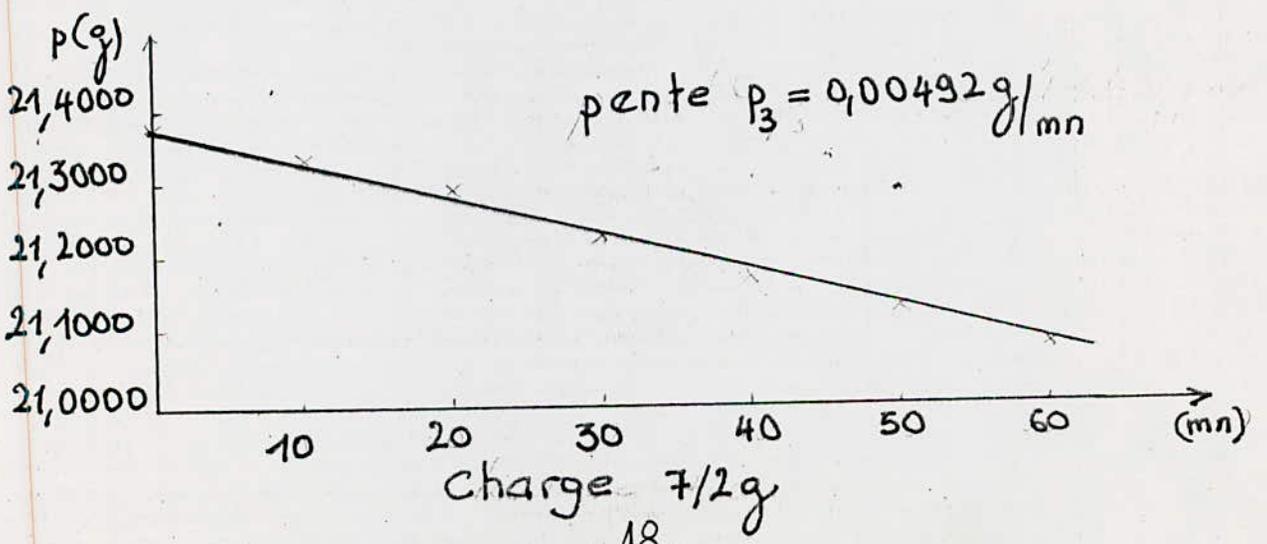
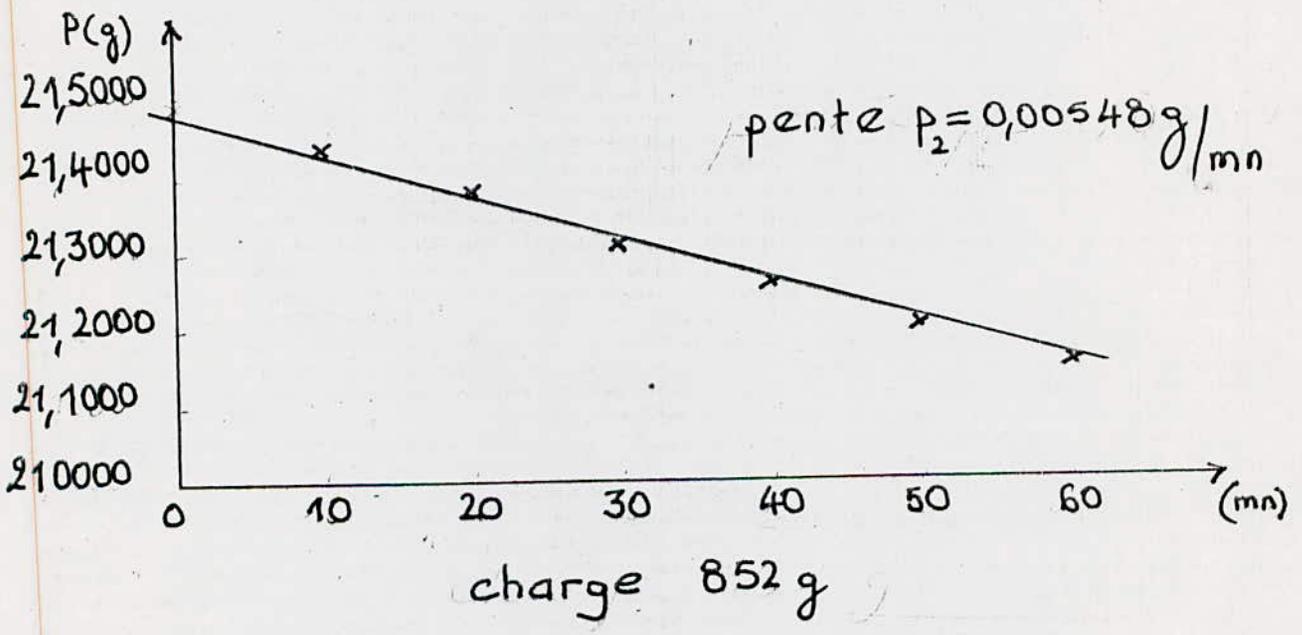
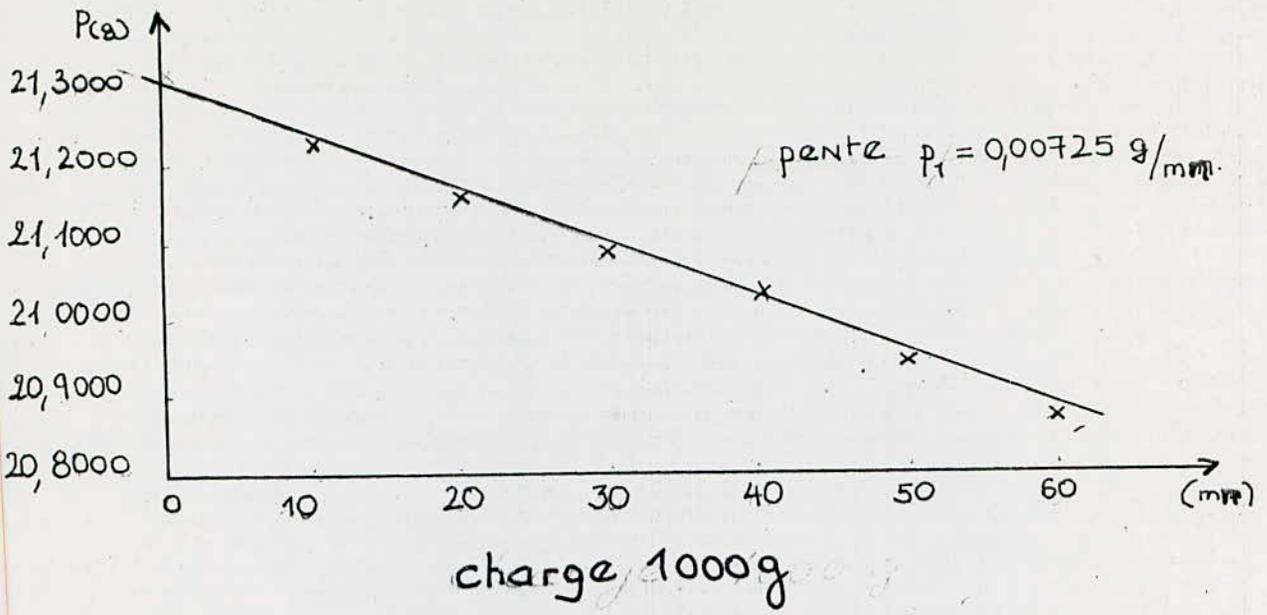
Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau ci après,

Tableau(I).

NB: La pesée se fait avant et après usure par une balance électronique.

Charge (I) 1000g)	Temps(mm)	0	10	20	30	40	50	60
	Poids(g)	21,3132	21,2382	21,1628	21,0970	21,0330	20,9500	20,8780
	m(g)	0,0750	0,0754	0,0658	0,0640	0,0830	0,0720	
Charge (II) 52g)	Temps(mm)	0	10	20	30	40	50	60
	Poids(g)	21,4935	21,4414	21,3846	21,3260	21,2677	21,2119	21,1659
	m(g)	0,0521	0,0568	0,0586	0,0583	0,0558	0,0460	
Charge (III) 12g)	Temps(mm)	0	10	20	30	40	50	60
	Poids(g)	21,3780	21,3420	21,2925	21,2366	21,1740	21,1344	21,0830
	m(g)	0,0360	0,0495	0,0559	0,0626	0,0396	0,0514	

Tableau (I)



#### V-2-4-4 INTERPRETATION DES COURBES.

On remarque que les courbes de variation du poids en fonction du temps sont des droites décroissantes, que le taux d'usure ; perte de poids par unité de temps, augmente avec l'augmentation de la charge.

Ainsi nous pouvons dire que les roues en contact avec de la matière abrasive et avec augmentation de charge s'usent de manière progressive avec le temps.

Les valeurs de la différence de poids ( $\Delta m$ ) le confirment. Nous remarquons une augmentation de ( $\Delta m$ ) avec le temps pour les différentes charges utilisées, toutefois nous remarquons aussi des diminutions de ( $\Delta m$ ) du fait que le débit de la matière abrasive n'est pas toujours constant.

#### V-2-5 ANALYSE DES CAUSES PROBABLES D'USURE.

Compte tenu des constatations faites sur les roues le problème d'usure des roues dans les zones sahariennes fait apparaître deux aspects:

- 1- Usure radiale de la table de roulement .
- 2- Usure importante du boudin (épaisseur) avec formation de boudin droit.

##### V-2-5-1 USURE RADIALE.

Pour expliquer cette dégradation plusieurs hypothèses peuvent être avancées:

##### a) INFLUENCE DU SYSTEME DE FREINAGE.

L'emploi de semelles composites provoque une usure radiale importante et permet d'expliquer l'augmentation d'usure constatée sur la locomotive. Ainsi que le freinage sec qui provoque la formation des plats et des ecaillements sur la table de roulement.

## b) INFLUENCE DE L'ENVIRONNEMENT.

L'influence de l'environnement, en particulier dans la zone désertique (présence de sable, de poussière abrasive, action des vents, cycle échauffement, refroidissement) peut également expliquer ce phénomène d'usure radiale.

En effet les vents néfastes transportent d'importantes quantités de poussières et de sable de différentes dimensions sur la voie ferrée, les particules dures jouent le rôle d'abrasives lorsqu'elles sont en contact avec la roue. Aussi l'échauffement des roues pendant le jour et leur refroidissement pendant la nuit peut influencer sur le changement des structures avec le temps.

### V-2-5-2 USURE DU BOUDIN.

a) Cette usure est à rapprocher de l'usure latérale du rail. L'usure devient plus significatif lorsque l'environnement est défavorable (zone de sable, atmosphère poussiéreuse)

b) L'usure du boudin est due aussi à l'insuffisance de graissage ou mauvais graissage, ainsi qu'à l'abrasion par les particules dures qui s'amalgament à l'huile de graissage lors de la circulation dans la zone sableuse.

### V-2-6- SOLUTIONS ENVISAGEES.

1- Amélioration de la nuance d'acier.

2- Rehabilitation de la voie.

La rehabilitation de la voie est à envisager et concerne le remplacement du rail actuel.

3- Amélioration des conditions de graissage.

La solution connue pour remédier à ce type de dégradation est de choisir le meilleur système de graissage.

4- Il faut lutter contre l'ensablement de la voie.

Un travail régulier et soutenu doit être fait aux abords de la voie p pour éliminer tout obstacle susceptible de créer une dune (pierres, sable et autres...).

5- Il est recommandes d'avoir un niveau de voie supérieur au niveau du sable.

# Conclusion

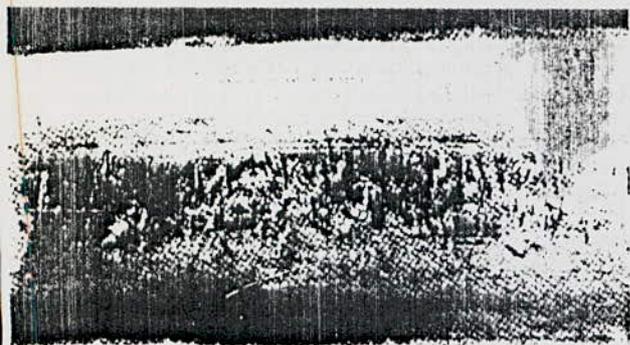
## VI-CONCLUSION.

L'étude faite sur l'usure des roues des locomotives a été menée dans des conditions défavorables qui ne permettaient pas d'observer tous les phénomènes métallurgiques et tribologiques qui influent sur le phénomène de la dégradation de la matière des roues.

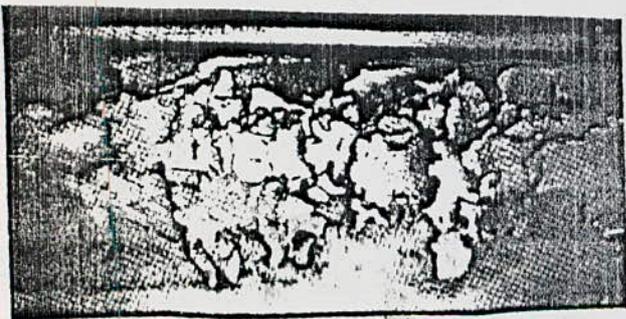
Pour cela notre étude aurait été mieux abordée si la S.N.T.F avait mis à notre disposition des roues neuves et tous les moyens nécessaires à la caractérisation et contrôle du matériau.

A cet effet nous proposons une étude détaillée sur le comportement du matériau de la roue dans des conditions similaires à celles exploitées dans les zones désertiques et cela demande une investigation tribologique qui permettra de choisir un matériau mieux adapté aux zones désertiques.

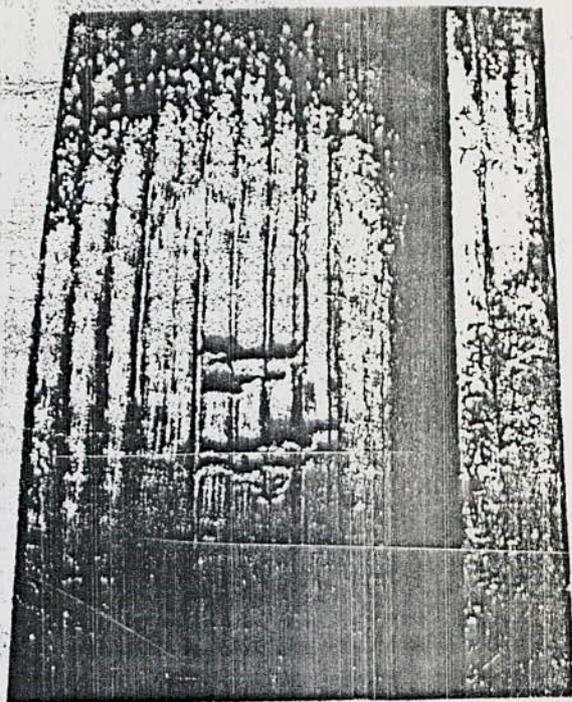
-Avaries d'usure-



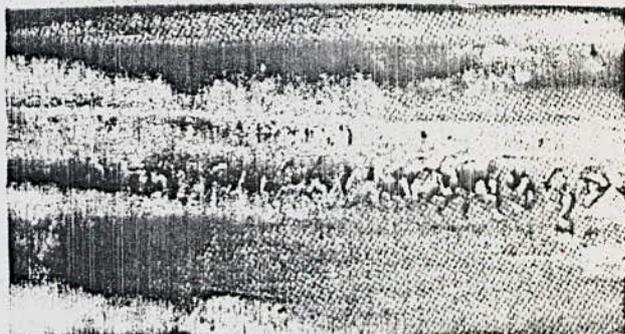
- Excoriation du métal entre  
craques thermiques fines (en haut)  
comparée avec une exfoliation  
véritable (en bas)



- Table de roulement avec apport de métal



- Défectuosité interne révélée  
par le tournage de la roue



- Table de roulement écaillée

# ANNEXES

## ANNEXE

AAR: Association Americaine de chemin de fer.

Classe B: Service à grande vitesse avec conditions de freinage  
modérées et avec des charges lourdes sur les roues.

Composition chimique de l'abrasif:

SiC	99,2- 99,6%
SiO <sub>2</sub> +Si metallique	0,5% max
C libre	0,15% max
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1% max
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15% max
Fe dissous	0,05% max

Caracteristiques generales:

Excessivement dure, tres tranchant.

Structure cristalline:

- SiC classe hexagonale.

Forme des grains:

Cubique, arrêtes vives.

Dureté Hv: en moyenne 2800 N/mm<sup>2</sup>.

# Bibliographie

- BIBLIOGRAPHIE -

- 1- Précis de métallurgie. Elaboration, structures-propriétés et normalisation. J. BARRALIS & G. MAEDER. 4<sup>ème</sup> édition.
- 2- Technologie professionnelle générale pour les mécaniciens t II. A. CAMPA.
- 3- Théories et pratiques industrielles du frottement. JJ.CAUBET.
- 4- Technique de l'ingénieur (partie usure)- de mécanique-
- 5- Technique de l'ingénieur - métallurgie-
- 6- Métallographie et traitement thermique des métaux. LAKHTINE. Quatrième édition- 1986.
- 7- La pratique des traitements thermiques des métaux industriels. D. DE SMET.
- 8- Usure, avarie, corrosion. JEAN DEHRS.
- 9- Précis de métallurgie. ROOS.
- 10- Revue, instructions d'entretiens- roues, essieux, pignon et engrenages d'essieux. Janvier 1981. S.N.T.F.
- 11- Revue générale des chemins de fer. Supplément au N° 5 1989. Edition DUNOD. S.N.T.F.
- 12- Revue, la forge CSW. Hawker Siddeley Canada Inc. S.N.T.F.
- 13- Réalisation d'un appareil d'usure (projet de fin d'étude) - promotion Janvier 1988. K. GHRAB & M.S. ZIANE.
- 14- Causes d'usure des pignons et des roues dentées. (projet de fin d'étude- Juin 1989). I.N.G.M. Boumerdes.

