



FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

Département de génie mécanique

MEMOIRE de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master académique en génie mécanique

Option : sciences des matériaux

**Etude de l'anisotropie de la résilience du
ressort à lames multiples en acier 55Cr3 de
la suspension pour camion k66 SNVI**

Réalisé par :

M^{elle} SEDDIK KHODJA AKILA

Proposé et dirigé par :

M^r ZIANI .H

Promotion : 2013

REMERCIEMENTS

Je remercie, avant tout, le bon DIEU de m'avoir donné la santé, le courage et la volonté pour finir ce travail.

Je tiens à remercier mon promoteur monsieur ZIANI.H pour ses orientations et sa disponibilité constante, tout au long de mon travail.

Je remercie également professeur Abdelaziz ATI qui m'a accompagné et orienté tout au long de la réalisation de mon travail.

Je tiens aussi à remercier professeur AZAM Saïd pour son appréciable aide au niveau de laboratoire SDM

Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail.

Sans omettre de citer aussi mes enseignants Mr Kacimi bachir et Mm kacimi fatiha sans oublier Mr Nechiche pour leur précieux conseils.

En particulier je remercie toute l'équipe qui travaille au niveau du hall de technologie de Oued Aissi pour toute aide qu'ils apportent aux étudiants.

Mes remerciements les plus chaleureux s'adressent à ma famille et surtout mes parents, mes frères et sœurs qui sont la source de cette réussite et qui m'ont soutenu et encouragé pour aller au bout de ce travail.

Je tiens également à remercier tout mes amis et camarades toutes les personnes qui m'ont apporté leurs aides de près ou de loin pour réaliser ce travail.



Je dédie ce travail à Mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

À mes très chers frères et sœurs : hocine et yazid, kahina, chafia, nawel et amira ainsi que ma belle sœur kahina à qui Je Souhaite le succès dans leur vie.

À ma très chère Mélina et à toute ma famille.

À tout mes amis(es) de près comme de loin, tout particulièrement Nora, djouher, Dalila, Hakima, Hacene, Saleme, Dalila, Sonia.

akila

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les ressorts à lames	
I-1 Introduction.....	2
I-2 Définition générale du ressort	2
I-3 Historique.....	2
I-4 Présentation du ressort à lames.....	3
I-5 Description des ressorts à lames.....	3
I-6 Les différents types de ressorts à lames.....	4
I.6.1.Ressorts à lame simple.....	4
I-6-2.Ressorts à lames multiples.....	5
I-6-3 Ressorts à flexibilité variable.....	8
I-7 Les parties essentielles d'un ressort à lames.....	11
I-7-1 Les différentes charges.....	13
I-7-2 Propriétés des ressorts à lames.....	13
Conclusion.....	15
Chapitre II : Matériaux pour ressorts à lames	
II-1 Introduction.....	16
II-2 Les matériaux métalliques pour ressorts à lames	16
II-2-1 Acier faiblement alliés.....	16
II-2-2 La microstructure des aciers.....	17
II-2-3 les différentes structures à l'état d'équilibre des aciers.....	18
II-2-4 Influence des éléments d'alliage sur le diagramme d'équilibre fer-Carbone	19
II-2-5 Microstructures exigées pour les lames de ressorts.....	20
II-3 Propriétés mécaniques exigées pour les lames de ressorts	21
II-3-1 les principaux éléments d'addition fixée par la norme AFNOR sont	21
II-3- 2 Influence des impuretés	22
II-3-3 influence des éléments d'alliages sur les caractéristiques des aciers	24
II-4.Gamme de fabrication	25
II.4.1Ligne de fabrication des ressorts à lames.....	27
II.4.2 Ligne de montage des ressorts	28
Conclusion	28
Chapitre III : Généralité sur la mécanique de la rupture	
III-1 Introduction	29
III-3 Types rupture élémentaires : fragile et ductile.....	29
III-3-1 Rupture de type fragile.....	30
III-3-1-1 Rupture transgranulaire	30
III-3 -1-2 Rupture intergranulaire	32
III-3-2 Rupture de type ductile	32
III-4 Types par fissuration progressive	33
III-4 -1 Echelle macroscopique	34
III-4 -2 Echelle microscopique	34

III-5 -Mécanique de la rupture et phénomènes de fatigue	35
III-6 Modes de propagation d'une fissure	35
Chapitre IV : Méthodes et techniques expérimentales	
IV-1 Introduction.....	37
IV-2 Essais mécaniques	37
IV-2-1 Essai de dureté Brinell (HB).....	37
IV-2-2 Essai de traction	38
IV-2-3 Essai de flexion.....	40
IV-2-4 Essais de fatigue	41
IV-2-5 Essai de résilience.....	42
IV-4- Examen Métallographique	47
IV-4-1- principes de la micrographie	47
IV-4-2 Examen au microscope électronique à balayage (MEB)	47
IV-5 Analyse chimique	49
IV-5-1 Analyseur du carbone LECO	49
IV-5-2 Analyse des autres éléments par le spectromètre d'émission	49
Conclusion	50
Chapitre V : Etude expérimentale et discussion des résultats	
V-1 Introduction	51
V.2 Le matériau d'étude	51
V. 3 Constituants de matériau	51
V.3.1 Analyse de la composition chimique	51
V.3.2 Influence des éléments d'additions	52
V-4 Réalisation des éprouvettes de résilience entaillée en V.....	53
V.4.1 découpage des éprouvettes	53
V-4.2 Usinage et dimensions des éprouvettes normalisées	54
V-5 Essais de résilience	54
V-5.1 résultats de l'essai de résilience	55
V.5.2 Interprétation des résultats	56
V.6 Analyse des faciès de rupture	57
V-6.1 Observation microscopique électronique à balayage (MEB) de l'acier 55Cr3 après rupture	57
Conclusion générale.....	63
Perspectives.....	64
Références bibliographiques.....	65

Listes des Figures

Figure I-1 Ressort à lames des véhicules routiers.....	3
Figure I-2 lames simple.....	4
Figure I-3 Ressort à lames égales.....	5
Figure I-4 Ressort à lames multiples.....	6
Figure I-5 Ressort triangulaire.....	6
Figure I-6 Ressort pincette.....	7
Figure I-7 Ressort transversal.....	8
Figure I-8 Caractéristiques de charge des ressorts à flexibilité variable.....	9
Figure I-9 compensateur et ressort principal.....	9
Figure I-10 Ressort à plusieurs faisceaux.....	10
Figure I-11 Ressort progressif.....	10
Figure I-12 Ressort à flexibilité variable à sabot et glissoir.....	11
Figure I-13 Ressort à lames multiples avant assemblage.....	12
Figure I-14 lame maitresse.....	15
Figure II-1 : Diagramme d'équilibre fer- carbone.....	18
Figure II-2 : Cycle thermique appliqué à des lames de ressort (trempe + Revenu).....	21
Figure II-3 : Diagramme représentant la gamme de fabrication des ressorts à lames.....	27
Figure III-1 Faciès micrographique : rupture fragile à clivage (rivières) (MEB) (N.A.Massicot, ENSAM).....	30
Figure III-2 Faciès micro fractographique : rupture fragile à clivage (languettes) (MEB) (N.A.Massicot, ENSAM).....	31
Figure III-3 Faciès micrographique : rupture fragile à clivage (franchissement d'un joint) (MEB) (N.A.Massicot, ENSAM).....	31
Figure III-4 faciès micrographique : rupture fragile inrergrannulaire (MEB) (N.A.Massicot, ENSAM).....	32
Figure III-5 Rupture ductile : formation de cupules (N.A.Massicot, ENSAM)	33
Figure III-6 rupture ductile en « bois pourri » (MEB) (N.A.Massicot, E NSAM).....	33
Figure III-7 Aspect microscopique de la rupture par fatigue.....	34
Figure III-8 Aspect microscopique de la rupture par fatigue : formation de stries (MEB) (N.A.Massicot, ENSAM).....	35
Figure III-9 Illustration des trois modes de propagation d'une fissure.....	36
Figure IV-1 : principe de dureté Brinell.....	38
Figure IV-2 : Machine d'essai universelle type IBERTTEST.....	38
Figure IV-3 : localisation de la zone de striction dans la partie étroite d'une	39

éprouvette à deux corps.....	40
Figure IV-4 : Epreuve de traction.....	40
Figure IV-5 : Représentation schématique de l'essai de flexion trois points et répartition des contraintes.....	41
Figure IV-6 : Photo d'un mouton pendule Charpy UGB.....	44
Figure IV-7: Schéma de principe de l'essai de résilience.....	45
Figure IV-8 : Epreuve Charpy U.....	46
Figure IV-9 : Epreuve entaillée en V.....	46
Figure IV-10 : Représentation schématique d'un microscope électronique à balayage équipé d'un système de microanalyse de rayons X.....	48
Figure V-1 : éprouvette de résilience entaillée en v.....	54
Figure V-2 : Schéma du principe de l'essai de résilience.....	55
Figure V-3: Faciès de rupture de l'éprouvette prélevée dans le sens de laminage D_L (Dans la partie gauche de la lame maitresse ($36,25 \text{ J/Cm}^2$))......	58
Figure V-4: Faciès de rupture de l'éprouvette prélevée dans le sens de laminage D_L (Dans la partie droite)......	58
Figure V-5: Faciès de rupture de l'éprouvette prélevée dans le sens de laminage D_L (Dans le sens à 45° par rapport a D_L et dans la partie gauche de la lame maitresse ($23,75 \text{ J/Cm}^2$))......	59
Figure V-6: Faciès de rupture de l'éprouvette prélevée dans le sens de laminage D_L (Dans le sens à 45° par rapport a D_L et dans la partie droite de la lame maitresse. ($20,63, \text{J/Cm}^2$))......	60
Figure V-7: Faciès de rupture de l'éprouvette prélevée dans le sens de laminage D_L (Dans le sens à 45° par rapport a D_L et dans le sens transverse et dans la partie gauche de la lame maitresse ($K_{cv} = 20 \text{ j/Cm}^2$))......	61
Figure V-8: Faciès de rupture de l'éprouvette prélevée dans le sens de laminage D_L (Dans le sens à 45° par rapport a D_L et dans la partie droite $k_{cv} = 17,50 \text{ j/cm}^2$	61

LISTES DE TABLEAUX

Tableau II 1: influence des éléments d'alliage sur les Caractéristiques d'acier.....	24
Tableau V1: résultats de l'analyse chimique de l'acier prélevé de la lame maitresse du ressort à lames multiples de l'acier 55Cr3 de la suspension du camion K66	51
Tableau V2: résultats de l'essai de résilience de la partie gauche et de la partie droite de la lame maitresse selon les différentes directions de prélèvement	55

Introduction Générale

Introduction

Vue l'évolution technologique, le ressort n'est plus le simple fil enroulé ou la traditionnelle lame découpée, par contre, une pièce mécanique comportant des spécifications techniques très précises nécessitant de la part du concepteur une parfaite connaissance de la matière utilisée et des techniques propre pour obtenir les résultats recherchés.

La fabrication des ressorts à lames, destinés à la suspension des véhicules industriels, utilise des aciers de diverses nuances, telles que : les aciers au silicium (46Si6, 40Si8, 56Si7), au chrome (55Cr3), au silicium-chrome (56SiCr7), au silicium – chrome- molybdène (45SiMo6) et au chrome- vanadium (51CrV4)

Les travaux de recherche restent ouverts pour optimiser la composition chimique de ces types d'aciers, qui confèreraient à ces lames de ressorts, une meilleure tenue en service.

A travers ce travail nous allons chercher si le matériau de notre étude l'acier 55Cr3 pour ressort à lames maitresse est anisotrope.

Pour répondre à cette question notre étude est consacrée à déterminer et caractériser l'anisotropie de la résilience de l'acier 55Cr3 pour ressort à lames maitresse.

Ce mémoire comporte deux parties, la première est une synthèse bibliographique donnant des généralités sur les lames de ressorts, ainsi que sur les matériaux destinés à la fabrication des lames de ressorts. La deuxième partie est consacrée aux techniques d'élaboration et de caractérisation et aux résultats expérimentaux.

Le premier chapitre, donne des généralités sur les lames de ressorts à savoir leur définitions et leur présentations .Le deuxième chapitre est consacré aux matériaux destinés à la fabrication des lames de ressorts et leur propriétés mécaniques. Au troisième chapitre nous nous intéresserons à la mécanique de la rupture en donnant quelques généralités sur la MDR ainsi que les types de rupture.

Dans le quatrième chapitre, nous parlerons sur les différentes méthodes et techniques expérimentales d'élaboration et de caractérisation et nous décrirons les différents essais mécaniques. Le cinquième chapitre est consacré aux résultats des examens métallurgiques et essais mécaniques nécessaires à notre étude ainsi que leur discussion.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les

Ressorts à lames

I-1 Introduction

Le rôle principal d'un ressort à lames en tant qu'élément portant de la suspension d'un camion, est de transformer l'énergie de choc en énergie oscillatoire, en vue d'obtenir le confort et l'augmentation de la sécurité en marche. De ce fait, le ressort à lames en tant qu'élément élastique de jonction entre roues et châssis doit transformer les chocs violents de la chaussée, en oscillations lentes et douces de la carrosserie[1].

I-2 Définition générale du ressort

Un ressort est un système dont la fonction est de se déformer sous l'action d'une force ou d'un couple puis de restituer l'énergie emmagasinée à la reprise de sa forme initiale [2].

I-3 Historique

Des peintures rupestres attestent que l'homme a inventé le ressort depuis plus de 10 000 ans, sous la forme de l'arc, constitué essentiellement d'une pièce courbe flexible ; utilisée pour chasser, sur les champs de bataille des romains et des grecs ; l'énergie accumulée en tordant d'énormes écheveaux de peaux est brusquement libérée et projetée avec force de divers projectiles.

D'autres applications des ressorts dans d'autres domaines (exemple du ressort en spirale pour l'horlogerie qu'on utilise au XV^{ème} siècle, le ressort hélicoïdale en le domaine du transport...etc.).

Au XVI^{ème} siècle, on a découvert les suspensions à l'aide de chaîne reliées à quatre pièces de bois.

Au XVII^{ème} siècle, apparaît un vrai ressort de suspension avec l'utilisation de lames d'acier.

En 1816, STEPHENSON installe des ressorts à lames entre la chaudière et le châssis en le but de résoudre les problèmes de tangage sur les locomotives[2].

I-4 Présentation du ressort à lames

Un grand nombre de véhicules routier et ferroviaires, notamment les plus lourds, Sont équipés de ressorts à lames posés sur deux appuis. Ces ressorts sont généralement composés de lames de différentes longueurs, de façon à ce rapprocher le plus possible d'un solide d'égale résistance.

La première lame, dite lame maitresse, porte éventuellement un œil à chaque extrémité pour l'assemblage avec les jumelles de menottes de suspension du châssis [3].

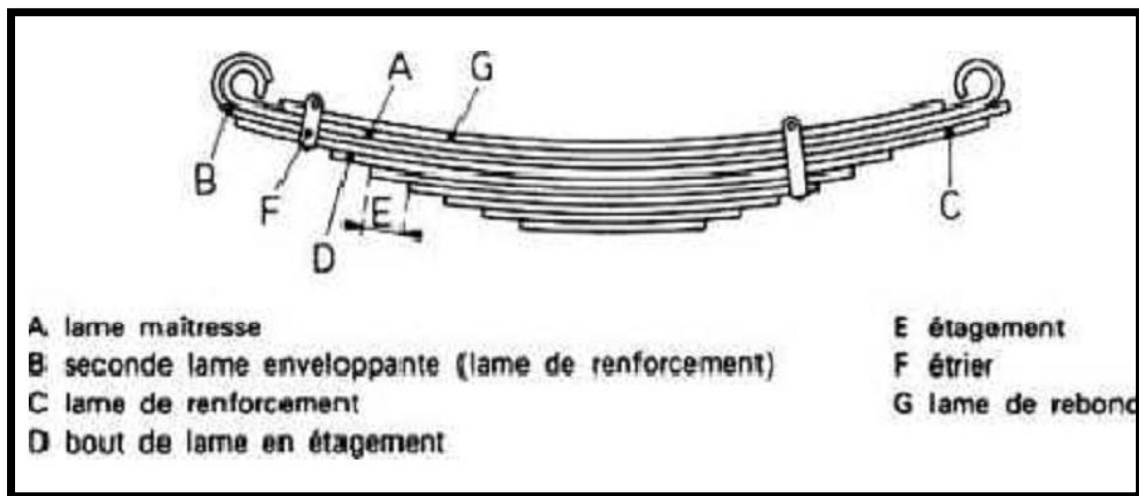


Figure I-1 : Ressort à lames des véhicules routiers

I-5 Description des ressorts à lames

Les lames de ressorts qui sont séparées en plusieurs faisceaux non chargés sont réunies que par les brides. A fur et à mesure que la charge augmente, les faisceaux des lames s'appliquent les uns sur les autres, ce qui permet l'augmentation de la rigidité du ressort.

Les faisceaux primaires (principaux), qui comportent la lame maitresse, fléchissent aux plus faibles charges, tandis que, les autres faisceaux auxiliaires n'interviennent que si la charge est plus élevée.

Le faisceau principal fléchit beaucoup plus, donc ses lames doivent être relativement minces. Contrairement aux autres faisceaux, ces dernières seront plus épaisses à la mesure que la flexion diminue. Quant il s'agit d'un ressort à lames multiples, le contact entre le faisceau se fait progressivement[4].

I-6 Les différents types de ressorts à lames[5]

I.6.1. Ressorts à lame simple

➤ *Lame simple*

Une lame chargée posée sur deux appuis peut être considérée comme la juxtaposition de deux bras flexibles solidarisés l'un à l'autre (**figure I.2**). Un bras de longueur l_1 supporte une charge P_1 égale à la réaction de l'un des appuis et un bras de longueur l_2 supporte la charge P_2 égale à la réaction de l'autre appui.

La charge Q portée par l'ensemble est égale et opposée à la somme des deux réactions :

$$Q = P_1 + P_2 \quad (1)$$

La longueur entre appuis est la somme des longueurs est :

$$L = l_1 + l_2 \quad (2)$$

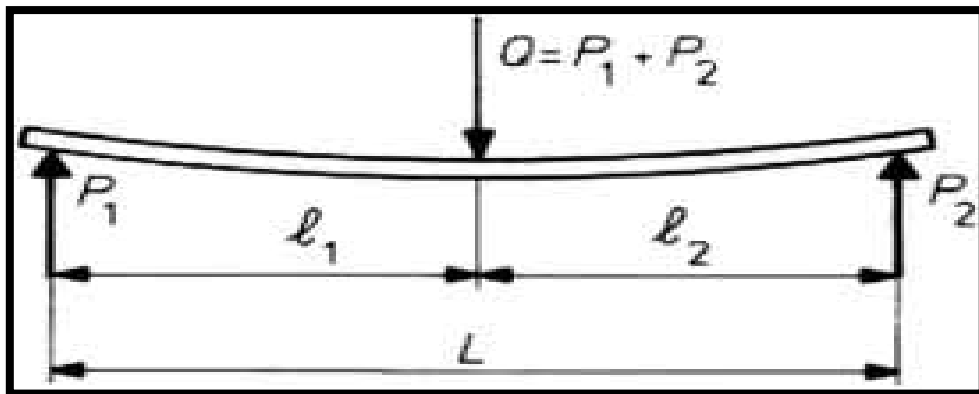


Figure I.2 : Lame simple

Connaissant la charge Q et les longueurs, les réactions sont données par les relations :

$$P_1 = \frac{Ql_2}{L} \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{Ql_1}{L} \quad (4)$$

➤ **Lames égales**

Le ressort à lames égales se compose :

- ✚ soit d'une lame simple (**figure I.2**) ;
- ✚ soit d'un faisceau de lames égales (**figure I.3**) appuyées sur les mêmes appuis et réunies entre elles vers leur milieu par une bride de liaison avec l'essieu du véhicule.

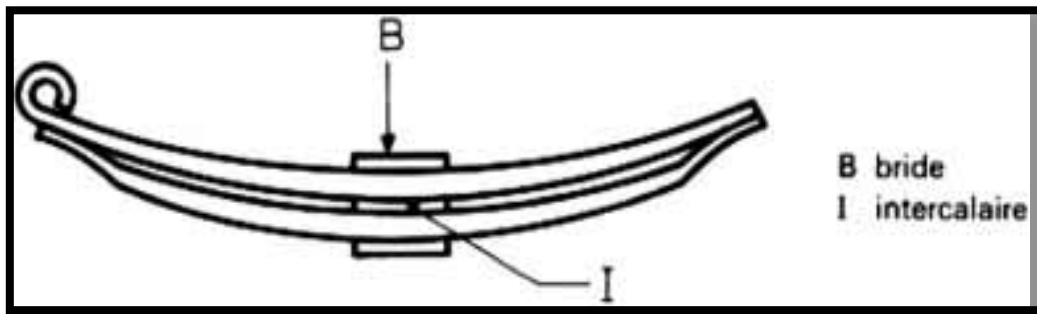


Figure I.3 : Ressort à lames égales

➤ **Lames dissymétriques**

Dans le cas général d'une lame dissymétrique, on peut calculer séparément les déflexions f_1 et f_2 .

Les déflexions f_1 et f_2 d'une lame dissymétrique à deux bras de même forme n'étant pas égales, le siège de la lame s'incline progressivement avec la charge. Quand il est nécessaire qu'il reste perpendiculaire à cette charge, il faut modifier le profil ou la découpe des bras de façon à avoir $f_1 = f_2$.

I-6-2. Ressorts à lames multiples

Le ressort à lames égales réalisé avec des lames paraboliques ou trapézoïdales procure un bon coefficient d'utilisation de la matière ; il est donc léger, mais nécessite des outillages coûteux pour son exécution, ce qui empêche son application aux petites séries. On a alors recours aux ressorts à lames multiples ou semi-elliptiques qui ne comportent que des lames d'épaisseur uniforme empilées en faisceau. Dans ce faisceau, toutes les lames ont, en principe, la même déformée circulaire.

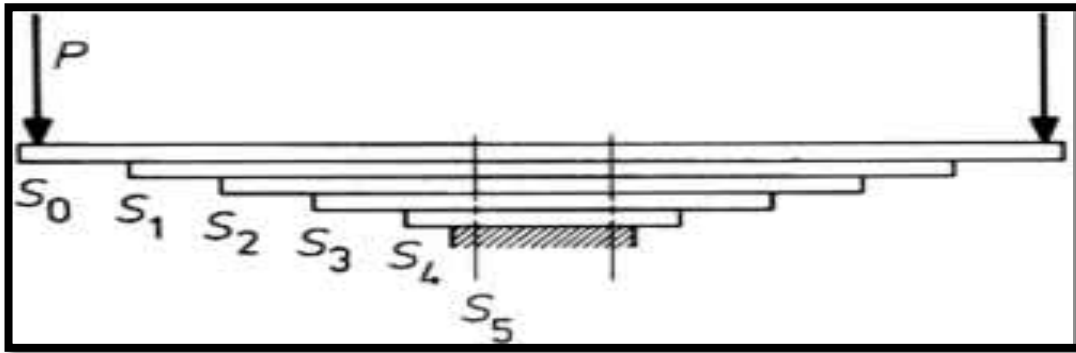


Figure I.4 : Ressort à lames multiples

➤ *Ressort triangulaire*

En première approximation, le ressort à lames multiples peut être considéré comme équivalent à une lame en losange (figure I.5) composée de deux bras triangulaires.

L'application directe d'une telle lame n'est pas possible, notamment à cause de sa trop grande largeur maximale B . On envisage alors la découpe de cette lame en $2N$ bandes de largeur $B/2N$ (figure I.5.a) parallèles à la droite qui réunit les sommets des bras triangulaires.

La réunion deux à deux des bandes symétriques et leur empilement suivant la (figure I.5.b) forme un ressort feuilleté de N lames de largeur $b = B/N$.

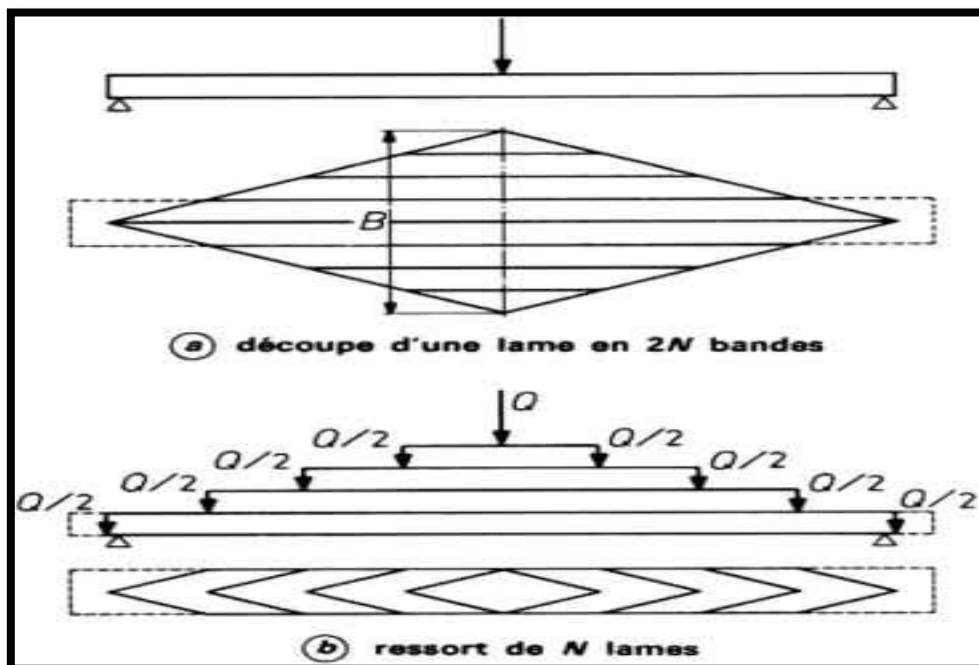


Figure I.5 : Ressort triangulaire

➤ **Ressort pincette**

La suspension de certains bogies comporte des ressorts pincettes (**figure I.6**) utilisés pour leur amortissement propre. Le ressort pincette est formé par l'assemblage d'une ou plusieurs paires de ressorts à lames multiples montés en opposition.

Les paires de ressorts disposées parallèlement sont réunies par deux mains en acier moulé dans lesquelles sont enclenchées toutes les extrémités des lames maîtresses, qui sont généralement en forme de crochet.

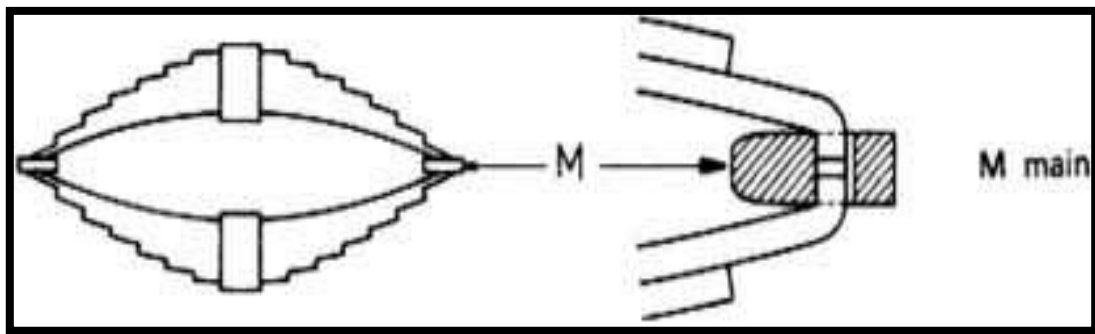


Figure I.6: Ressort pincette

➤ **Ressort transversal**

Certains véhicules sont suspendus par un ressort transversal (**figure I.7**) qui est articulé sur deux paliers solidaires du châssis et qui répartit également sur les deux roues le poids du véhicule. Grâce aux deux paliers, une déflexion à une extrémité du ressort provoque une déflexion sensiblement égale à l'autre extrémité, d'où une meilleure répartition des charges sur les roues et une stabilisation du véhicule. La partie de ressort comprise entre les deux paliers a une section uniforme et est soumise à un moment constant. Les deux parties situées en dehors des paliers ont une section variable en forme de ressort triangulaire ou de profil parabolique.

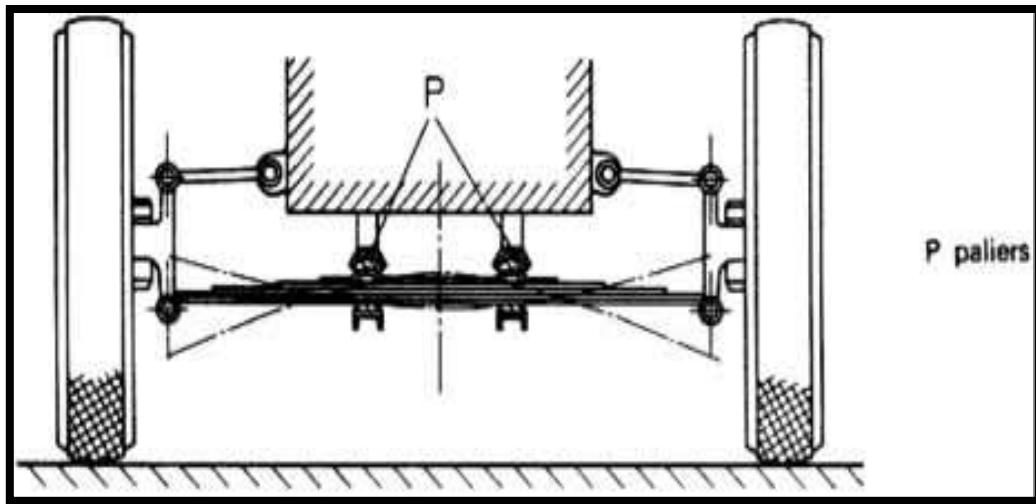


Figure I.7 : Ressort transversal

I-6-3 Ressorts à flexibilité variable

Les ressorts à flexibilité variable s'appliquent aux fortes variations de charge. D'abord appliqués aux autobus et à la suspension arrière des camions, ils s'étendent de plus en plus aux véhicules légers, à mesure que l'on en réduit la charge à vide.

La caractéristique de charge (P en fonction de f) de ces ressorts n'est plus une droite (**figure I.8**). Elle est dite progressive quand la raideur $R = P / f$ est croissante et dégressive quand la raideur est décroissante.

La variation de flexibilité peut être obtenue de plusieurs façons que l'on peut combiner :

- ✓ Compensateur
- ✓ faisceaux auxiliaires ou sabot.
- ✓ On peut faire également varier la flexibilité à l'aide des jumelles

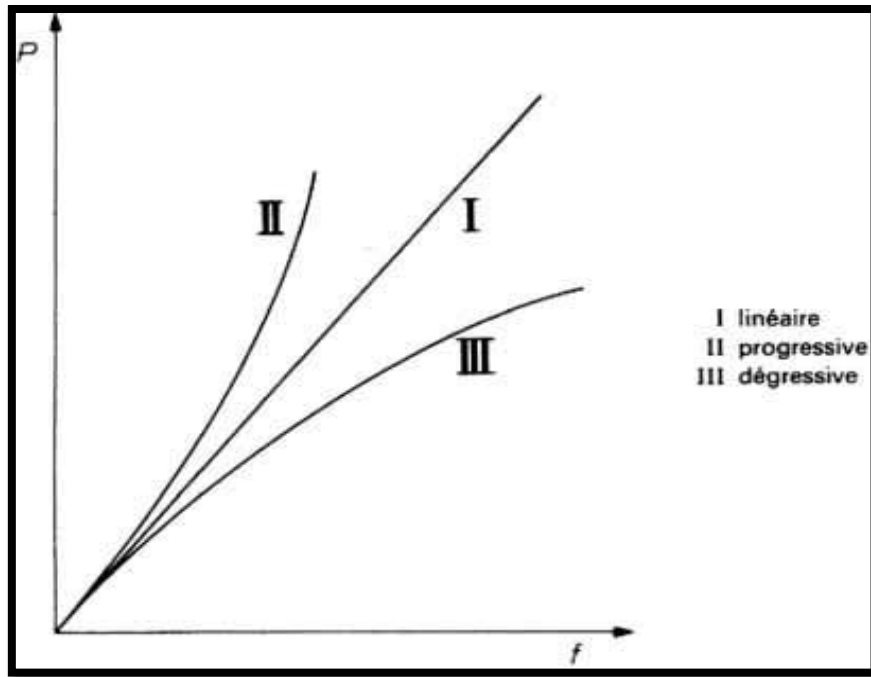


Figure I.8 : Caractéristiques de charge des ressorts à flexibilité variable

➤ Compensateur

C'est un ressort à lames à deux glisseurs qui coopère avec un ressort principal auquel il est attaché par le même bridage (**Figure I.9**). Deux sabots sont situés en face des glisseurs mais à une certaine distance ; les glisseurs n'y appuient qu'à partir d'une certaine charge du véhicule. À cette charge, la suspension devient brusquement plus raide. Le compensateur est ordinairement plus court et plus raide que le ressort principal. Il s'applique surtout à des poids lourds qui voyagent exclusivement à vide ou à pleine charge.

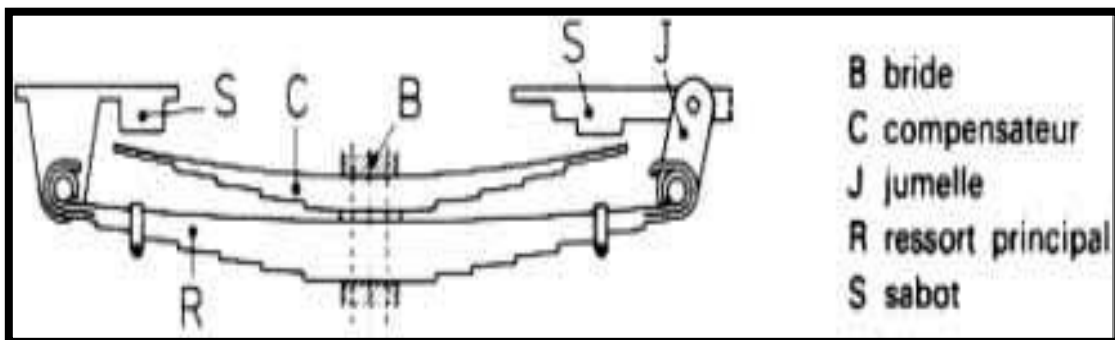


Figure I.9: Compensateur et ressort principal

➤ **Faisceaux auxiliaires.**

Les lames d'un ressort peuvent être séparées en plusieurs faisceaux (**figure I.10**) qui, non chargés, ne sont réunis que par le bridage. Quand le ressort est chargé et à mesure que la charge augmente, les faisceaux de lames s'appliquent les uns sur les autres et la raideur du ressort augmente.

Le premier faisceau qui comporte la lame maîtresse fléchit aux plus faibles charges ; il s'appelle faisceau primaire ou principal. Tous les autres faisceaux sont des faisceaux auxiliaires et n'interviennent qu'à partir de charges d'autant plus élevées qu'ils sont plus éloignés du faisceau primaire. Le faisceau primaire fléchit beaucoup plus et doit être fait de lames relativement minces. Celles des autres faisceaux seront de plus en plus épaisses à mesure que la flexion diminue.

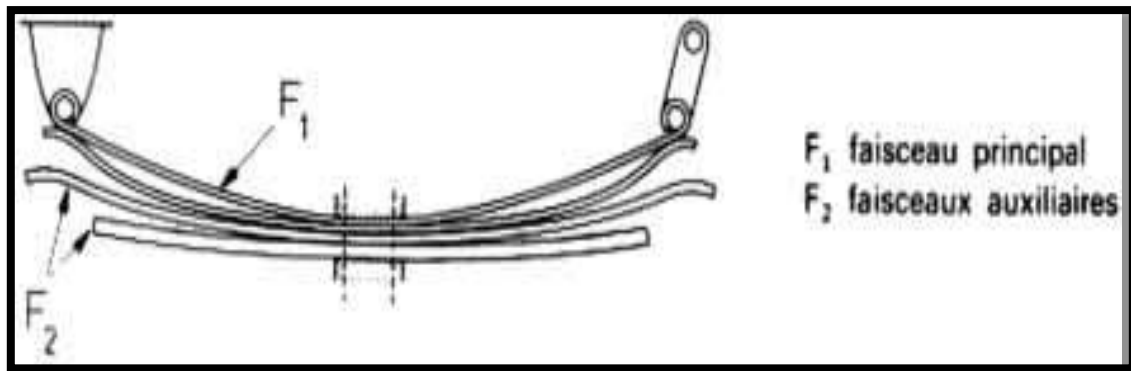


Figure I.10: Ressort à plusieurs faisceaux

➤ **Ressorts progressif**

Ensemble formé d'un seul paquet de lames dont les plus petites de courbure moindre, ne s'appuient sur les précédentes que progressivement, à partir d'une charge (**figure I.11**)

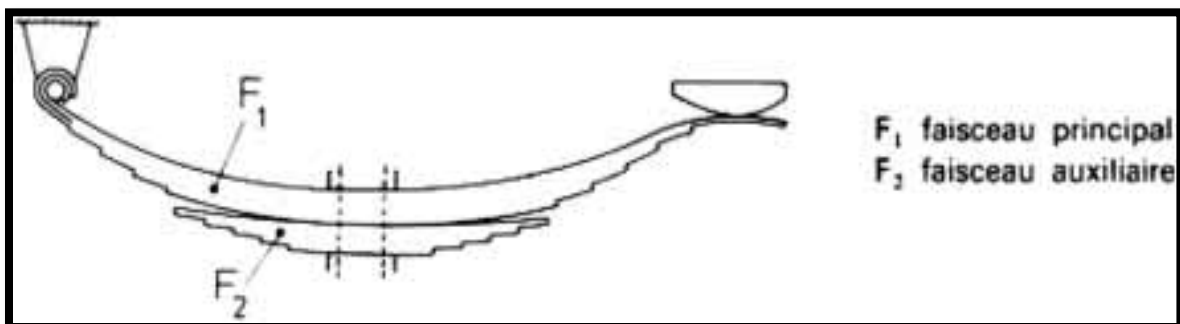


Figure I.11 : Ressort progressif

➤ **Ressorts à sabot et glissoir**

Le sabot associé au glissoir d'une lame maîtresse (**figure I.12**) peut être relativement long. Sa forme peut être déterminée de façon que la lame maîtresse, à faible charge, appuie à l'extrémité la plus éloignée et que le contact entre la lame maîtresse et le sabot se déplace à mesure que la charge augmente. La longueur utile du ressort diminue avec la charge ; la raideur du ressort est progressive.

Une détermination judicieuse du sabot permet d'obtenir toutes les caractéristiques de charge souhaitées. Il n'est pas utile de faire intervenir un sabot flexible comme on l'a parfois proposé.

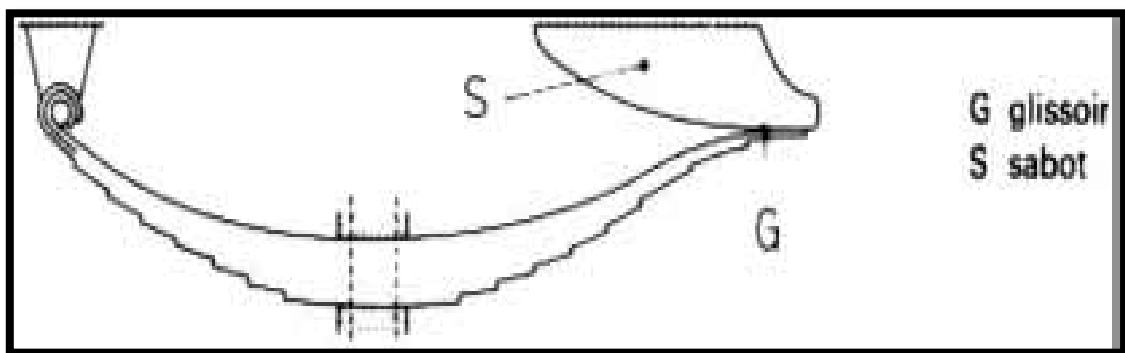


Figure I.12 : Ressort à flexibilité variable à sabot et glissoir

I-7 Les parties essentielles d'un ressort à lames [5]

a. La lame maîtresse

La lame maîtresse, ou maîtresse feuille assure par ses extrémités la liaison avec le véhicule ; elle transmet donc tous les efforts et tous les couples dus aux charges, aux accélérations et freinages, aux irrégularités de la route, ...etc.

b. *Lame sous –maîtresse*

Lame de renforcement, de même longueur, aussi active que la lame maîtresse située juste au-dessous de celle-ci.

C. Contre lame

La contre-lame est une courte lame qui coopère avec un étrier pour renforcer un œil fortement sollicité. Elle diminue les contraintes d'une lame maîtresse au voisinage de l'œil mais n'intervient pas sur les autres contraintes et sur la raideur du ressort.

d . *Lame de rebond*

La lame de rebond est placée contre la face tendue (généralement concave) de la lame maîtresse, à l'opposé des autres lames. Elle est principalement utilisée sur les ressorts des véhicules tout terrain pour renforcer la lame maîtresse qui doit porter l'essieu quand le véhicule rebondit et qui est soumise à la torsion quand il y a une grande dénivellation entre les deux roues d'un même essieu.

e. *Étoquiau Boulon central*

Toutes les lames sont percées d'un trou et réunies par un boulon central dit étoquiau. Quand cet assemblage est réalisé, toutes les lames sont appliquées les unes sur les autres sur toute leur longueur.

La tête du boulon central, généralement cylindrique, sert au positionnement du ressort par rapport à l'essieu du véhicule. Elle s'applique à la plus petite lame quand le ressort doit être disposé au-dessus de l'essieu, à la lame maîtresse quand il doit être disposé au-dessous de l'essieu.

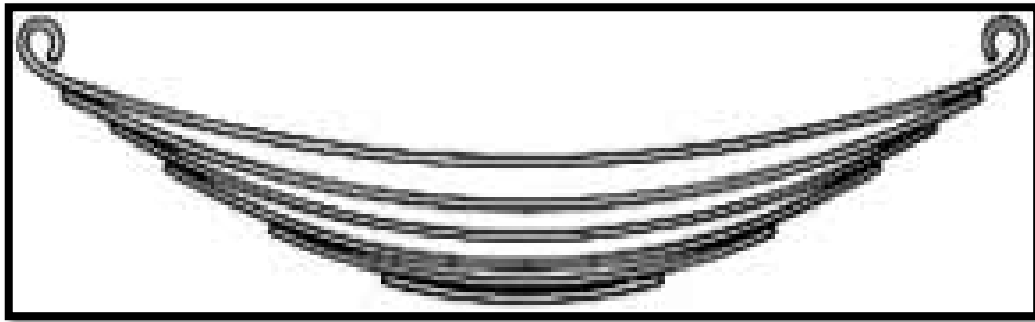


Figure I.13 : Ressort à lames multiples avant assemblage

f. *Œil*

Extrémité enroulée de la lame maîtresse, et parfois d'une autre lame.

g. *Bride*

La bride est un élément qui assure la liaison permanente du ressort avec son siège. Elle se compose généralement de plaques réunies par des boulons droits ou en U qui doivent serrer fortement le ressort sur son siège, pour diminuer les contraintes autour du boulon central.

h. *Étriers*

Les étriers emprisonnent plusieurs lames du ressort et évitent leur déploiement en éventail quand le ressort est soumis à des efforts latéraux et quand la zone bridée du ressort est soumise à un couple de déroulement dû aux accélérations ou freinages.

i. Les jumelles

Articulations réunissant les extrémités des ressorts aux longerons du châssis et leur permettant de s'allonger sous l'influence d'un choc ou d'une surcharge.

I-7-1 Les différentes charges [5]**a. Charge à vide**

Poids mort supporté par le ressort (châssis en ordre de marche et la carrosserie).

b. Charge maximale autorisée

Poids supporté par le ressort quand le véhicule atteint son poids total en charge (à vide et charge utile maximale (marchandise et voyageurs)).

c. Charge en butée

Poids supporté par le ressort fléchi au maximum représentant la limite supérieure que l'on ne dépassera jamais.

d. Surcharge

Charge dépassant la charge maximale autorisée. Il s'agit de toute la force exercée sur le ressort, et non pas seulement de la différence entre la charge considérée et la charge maximale autorisée. Elle se mesure en kilogramme (kg).

I-7-2 Propriétés des ressorts à lames[6]**a) La flèche**

Distance entre le centre du poinçonnage de la lame maîtresse et la tangente commune inférieure aux bagues des deux œil.

La flèche est nulle, si la lame maîtresse est rectiligne, elle est positive si la lame maîtresse est située au dessous de la position rectiligne et elle est négative dans le cas contraire ; On l'appelle alors contre flèche. On l'évalue en millimètre (mm).

b) Flexion

Différence entre la flèche sans charge et une flèche quelconque. Elle est positive pour un accroissement de la charge ; on l'évalue en millimètre (mm)

c) Flexibilité

Flexion du ressort pour 100 kg de charge. Si le ressort est simple, la flexibilité est une constante ; s'il est complexe, la flexibilité est variable, généralement décroissante quand la charge augmente. Elle se mesure en millimètre (mm) par 100 kilogrammes (kg). On distingue :

➤ **la flexibilité nominale**

C'est celle des lames composant le ressort, sans tenir compte de l'influence de la jumelle ou des patins

➤ **la flexibilité réelle**

Tient compte de l'influence du montage (jumelle ou patin).

d) Raideur

C'est l'inverse de la flexibilité. C'est la charge en kilogramme (kg) produisant une flexion d'un (01) millimètre (mm)

e) Contrainte

Force par unité de surface agissant dans une direction déterminée ; on l'exprime en Newton par mm² (N/mm²) ; on distingue :

➤ **la contrainte de flexion**

S'exerce sur toute la longueur du ressort, elle est due à la charge elle-même. C'est la contrainte principale du ressort.

Au moment de l'accélération ou du freinage, le ressort encaisse le couple d'accélération ou de freinage qui se traduit par une contrainte supplémentaire :

➤ **la contrainte de traction ou compression**

Qui s'exerce sur les axes des œil, au moment des virages par exemple.

➤ **la contrainte de torsion**

Qui s'exerce sur les axes des œil, au moment des virages.

➤ **la contrainte de cisaillement**

Qui s'exerce sur les extrémités des lames à l'extrémité des patins.

f) Butée

Se produit lorsqu'une partie rigide de l'essieu prend appui sur une partie rigide du châssis.

➤ **Installation des ressorts à lames sur véhicule routiers [7]**

➤ **Exemple pour la lame maitresse**

La lame maitresse, ou maitresse feuille (**figure I.14**) assure par ses extrémités la liaison avec le véhicule, elle transmet donc tous les efforts et tous les couples dus aux charges, aux accélérations et freinages, aux irrégularités de route...etc.

La liaison avec le véhicule se fait généralement par enroulement de l'extrémités des lames maitresses appelé œil ou rouleau et, parfois, par simple appui de la lame sur un sabot

plat ou incurvé. La portée de la lame sur le sabot est appelée glissoir. Le glissoir est parfois enformé dans un boîtier comportant du caoutchouc ou autre matière souple.

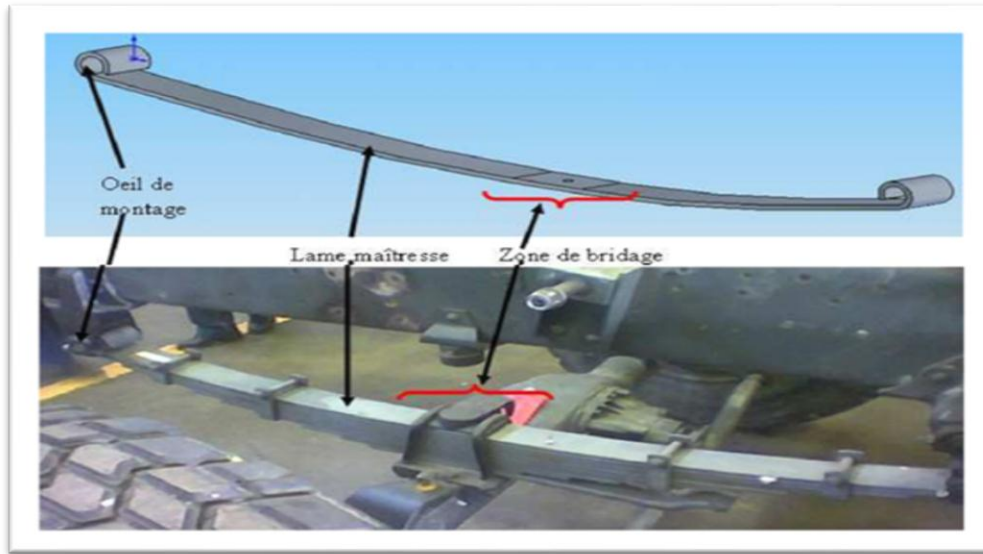


Figure I.14: Lame maîtresse

Conclusion :

Nous pouvons constater que le ressort à lames est un organe complexe qui exige des formes ainsi qu'un traitement bien spécifique pour sa fabrication.

Chapitre II

Matériaux pour ressorts à lames

II-1 Introduction

Pour le bon fonctionnement des ressorts à lames dans les meilleures conditions, certaines exigences ont été posées aux aciers à ressorts à savoir :

- Faible tendance à la décarburation ;
- Bon état de surface ;
- Structure homogène ;
- Trempe et revenu à cœur suffisants ;
- Limite d'élasticité élevée ;
- Homogénéité marquée de toutes les caractéristiques permettant une production en série rationnelle [8].

II-2 Les matériaux métalliques pour ressorts à lames

Les matériaux métalliques les plus intéressants pour la fabrication des ressorts à lames sont ceux qui peuvent emmagasiner le maximum d'énergie par unité de volume.

Les plus utilisés sont les aciers faiblement alliés au silicium, manganèse, chrome, tungstène, vanadium et nickel.

Ces éléments assurent la pénétration de trempe et la trempabilité requise, affinent le grain et augmentent la tenue à la relaxation. Ils confèrent également à l'acier une résistance aux faibles déformations plastiques et une limite de fatigue élevée [9].

II-2-1 Acier faiblement alliés

Pour ce type d'acier, aucun élément d'addition n'atteint la teneur de 5%. Le premier nombre est la teneur moyenne en carbone exprimée en centième.

Les lettres sont les symboles abrégés de éléments d'alliages rangés dans l'ordre des teneurs décroissantes. Lorsqu'il y a un grand nombre d'éléments, on se limite aux symboles strictement indispensables.

Les chiffres qui suivent le groupe de lettres, rangés dans le même ordre que celles-ci sont obtenus en divisant la teneur moyenne des éléments par quatre pour les éléments Cr, Co, Mn, Ni, Si, et par dix pour les autres éléments [9].

II-2-2 La microstructure des aciers [9]

Les différentes structures à l'état d'équilibre qui peuvent présenter les aciers sont résumées sur le diagramme d'équilibre fer – carbone de la (**Figure II-1**).

- ❖ Les aciers hypoeutectoïdes, dont la teneur en carbone est inférieure à 0.8%
- ❖ L'acier eutectoïde, dont la teneur en carbone est égale à 0.8%. A la température de 721° C, s'effectue la transformation eutectoïde suivante :



- ❖ Les aciers hypereutectoïdes, dont la teneur en carbone est supérieure à 0.8 % et inférieure à 2.17 %.

Concernant la nature des phases présentées dans le diagramme d'équilibre Fe-C, nous citons :

- ✓ **L'austénite γ** : cubique à faces centrées, est une solution solide d'insertion du carbone dans le fer γ . Sa solubilité maximale est de 2.17 à 1147° C et 0.8 % à 712°C.
- ✓ **La ferrite α** : cubique centrée, est une solution d'insertion du carbone dans le fer α . sa solubilité est de 0.02% à 72°C et 0.006 % à la température ambiante.
- ✓ **La cémentite** : est un carbure de fer, de formule Fe_3C , avec une teneur en carbone égale à :

$$\% C(Fe_3C) = \frac{12}{12 + 3 * 56} = 6.67\%$$

- ✓ **La perlite**: est un agrégat de ferrite et de cémentite. C'est un eutectoïde formé de 88% de ferrite et de 12% de cémentite, si on admet que sa teneur en carbone est de 0.8%.
- **A₁** : température d'équilibre définissant la limite inférieure du domaine d'existence de l'austénite.
- **Ac₁** : température à laquelle l'austénite commence à se former au cours du chauffage.
- **Ac₃** : température à laquelle la ferrite achève sa transformation en austénite au cours du chauffage.
- **Ac_{cm}** : température à laquelle la cémentite d'un acier hypereutectoïde achève de se dissoudre au cours du chauffage.

- **Ar_1** : température à laquelle l'austénite achève sa transformation en ferrite ou en cémentite au cours du refroidissement.
- **Ar_3** : température à laquelle la ferrite commence à se former au cours du refroidissement.
- **Ar_{cm}** : température à laquelle la cémentite commence à se former au cours du refroidissement d'un acier hypereutectoïde.

La perlite peut prendre deux aspects morphologiques :

- Lamellaire** : formée de fines lamelles de cémentite alternées avec des bandes de ferrite plus larges.
- Globulaire** : dans ce cas, la cémentite se présente sous formes de petits globules dans une matrice ferritique du grain perlitique. Cette morphologie coalescée est obtenue après un recuit de globularisation (adoucissement).

II-2-3 les différentes structures à l'état d'équilibre des aciers [9]

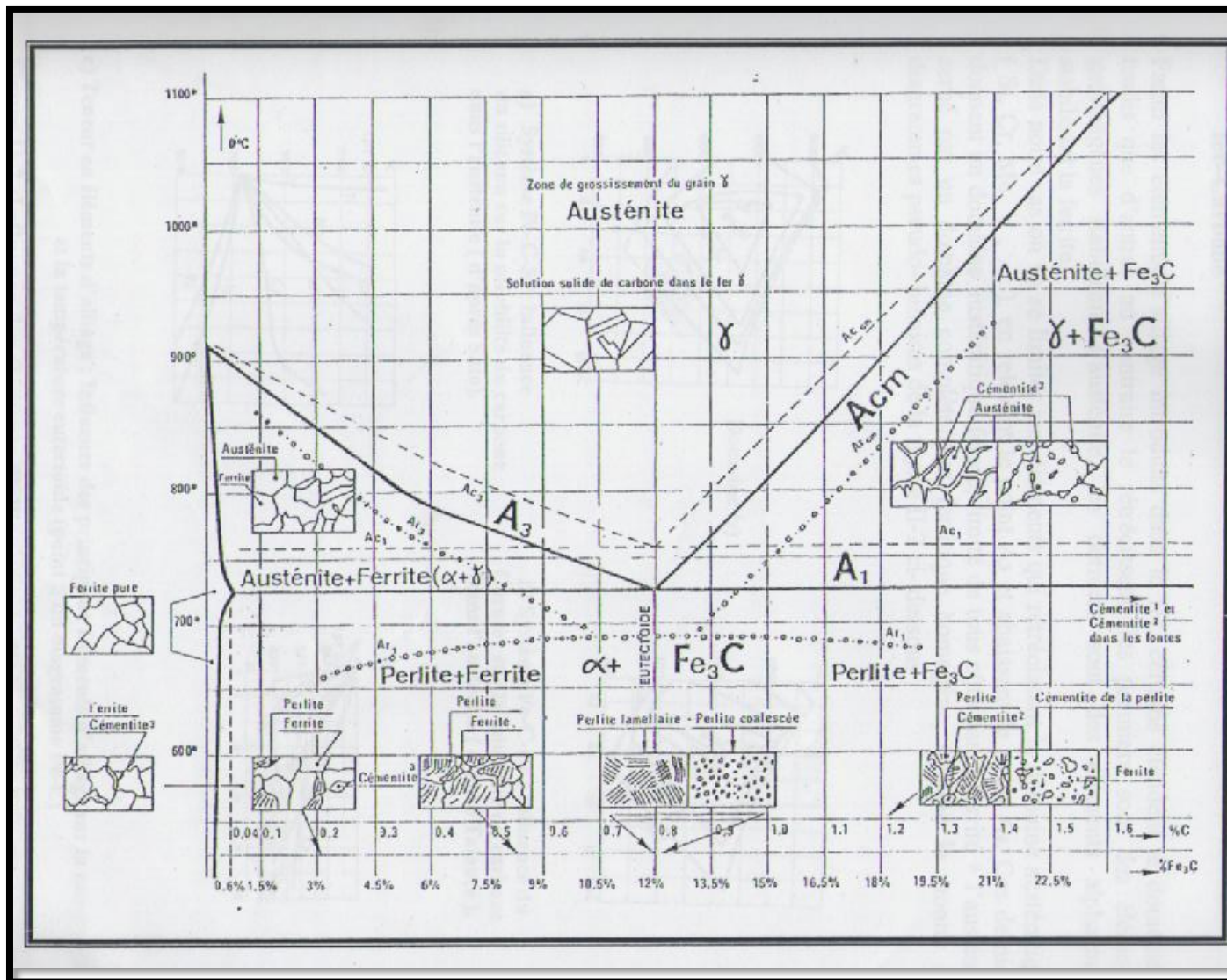


Figure II-1 : Le diagramme d'équilibre fer – carbone

II-2-4 Influence des éléments d'alliage sur le diagramme d'équilibre fer-Carbone [9]

- **Le carbone**

A une importance primordiale car c'est lui qui, associé au fer, confère à l'alliage le nom d'acier. Son influence sur les propriétés mécaniques de l'acier est prépondérante. Par exemple, en ce qui concerne l'amélioration de la propriété de dureté, l'addition de carbone est trente fois plus efficace que l'addition de manganèse.

- **L'aluminium**

Excellent désoxydant. Associé à l'oxygène, réduit la croissance du grain en phase austénitique. Peut rendre l'acier inapte à la galvanisation à chaud.

- **Le chrome**

C'est l'élément d'addition qui confère à l'acier la propriété de résistance mécanique à chaud et à l'oxydation (aciers réfractaires). Il joue aussi un rôle déterminant dans la résistance à la corrosion lorsqu'il est présent à une teneur de plus de 12 à 13 % (selon la teneur en carbone). Additionné de 0,5 % à 9 % il augmente la trempabilité et la conservation des propriétés mécaniques aux températures supérieures à l'ambiante (famille des aciers alliés au chrome).

- **Le cobalt**

Utilisé dans de nombreux alliages magnétiques. Provoque une résistance à l'adoucissement lors du revenu.

- **Le manganèse**

Forme des sulfures qui améliorent l'usinabilité. Augmente modérément la trempabilité.

- **Le molybdène**

Augmente la température de surchauffe, la résistance à haute température et la résistance au fluage. Augmente la trempabilité.

- **Le nickel**

Rend austénitiques les aciers à forte teneur en chrome. Sert à produire des aciers de trempabilité modérée ou élevée (selon les autres éléments présents), à basse température d'austénitisation et à ténacité élevée après traitement de revenu.

C'est l'élément d'alliage par excellence pour l'élaboration des aciers ductiles à basses températures (acier à 9 % Ni pour la construction des réservoirs cryogéniques, acier à 36 % Ni dit INVAR pour la construction des cuves de méthaniers et des instruments de mesure de précision).

- **Le niobium**

Même avantage que le titane mais beaucoup moins volatil. Dans le domaine du soudage il le remplace donc dans les métaux d'apport.

- **Le phosphore**

Augmente fortement la trempabilité et la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité de revenu.

- **Le silicium**

Favorise l'orientation cristalline requise pour la fabrication d'un acier magnétique, augmente la résistivité électrique. Améliore la résistance à l'oxydation de certains aciers réfractaires. Utilisé comme élément désoxydant.

- **Le tungstène**

Améliore la dureté à haute température des aciers trempés revenus. Fonctions sensiblement identiques à celles du molybdène.

- **Le vanadium**

Augmente la trempabilité. Élève la température de surchauffe. Provoque une résistance à l'adoucissement par revenu (effet de durcissement secondaire marqué).

II-2-5 Microstructures exigées pour les lames de ressorts [10]

Le traitement thermique sous contrainte (cintrage) est composé d'une trempe à l'huile à partir du domaine austénitique suivie d'un revenu entre 510 et 520 °C. Cette gamme de traitement thermique confère au matériau une structure sorbitique (matrice ferritique dans laquelle on trouve des précipités de cémentite).

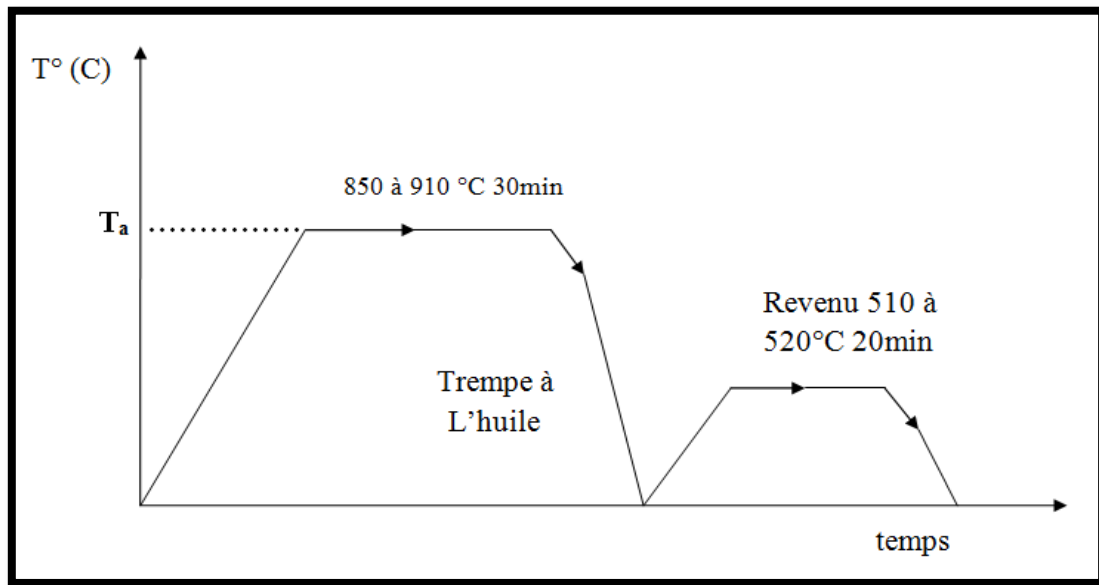


Figure II-2: Cycle thermique des lames de ressort (trempe + revenu)

II-3 Propriétés mécaniques exigées pour les lames de ressorts [11]

II-3-1 les principaux éléments d'addition fixée par la norme AFNOR sont

a) Le carbone

Après un refroidissement lent, la structure d'un acier comporte la ferrite α et la cémentite Fe_3C . La quantité de cémentite Fe_3C dépend de la teneur en carbone ; l'augmentation de la teneur en carbone accroît la dureté, la charge à la rupture et la limite élastique tout en diminuant l'allongement, la striction et la résilience.

b) Le chrome

La propriété fondamentale du chrome est de favoriser la pénétration de trempe ; c'est grâce à lui qu'il est possible d'obtenir des pièces de grosses épaisseurs, trempées à cœur (le domaine de transformation martensitique pourra être atteint avec de plus faibles vitesses de refroidissement). Des aciers au chrome pourront être trempés à l'huile ou même à l'air. Le chrome augmente également la résistance mécanique.

Lorsque l'acier, après trempe, est soumis à un revenu, il s'adoucit plus lentement et à de plus hautes températures une autre propriété du chrome est celle d'augmenter considérablement l'élasticité de l'acier et de lui communiquer une résistance au choc particulier. Ceci vient du fait qu'il possède une grande affinité pour le carbone avec lequel il donne une cémentite alliée au chrome de type $(Fe,Cr)_3C$; plus dure que la cémentite classique

Fe_3C . De ce fait, le chrome accroît la dureté, la résistance à traction et à l'usure de l'acier mais sans augmenter sa fragilité.

c) Le silicium

Il se rencontre dans tous les aciers, avec de faibles teneurs, de l'ordre de 0,2 à 0,5%. Comme élément d'addition, il est alors utilisé comme désoxydant. Soluble dans la ferrite, le silicium a un effet durcissant comparable à celui du manganèse, mais il a tendance à diminuer la soudabilité de l'acier.

d) Le vanadium

Affine le grain primaire donc la structure de coulée, accroît la résistance à l'usure, la tenue à la chaleur et inhibant la trempe à l'air suite à la formation des carbures, il favorise l'aptitude au soudage des aciers de traitement.

e) Le manganèse

En raison de ses propriétés, le manganèse se trouve, en plus ou moins grande quantité, dans presque tous les aciers. Il est désoxydant et désulfurant. Sa présence en quantité suffisante dans l'acier est une garantie contre l'oxydation et les effets nuisibles du soufre. En proportion courante, c'est-à-dire à moins de 1%, il ne nuit pas à la soudabilité de l'acier doux, comme il facilite le forgeage du métal. Il rend l'acier sensible à la pénétration de trempe. L'excès de manganèse rend l'acier cassant. Dans un acier très carburé, à 1% de manganèse, on trouve très facilement des traces de trempe.

C'est pourquoi, on impose généralement pour les aciers durs des teneurs en manganèse inférieures ou égales à 0,70%. En solution solide dans la ferrite, il exerce un effet durcissant et abaisse la température de transition ductile-fragile. Combiné au soufre, il forme du sulfure de manganèse qu'on retrouve sous forme d'inclusions.

II-3- 2 Influence des impuretés [11]

À côté des éléments d'addition principaux qui définissent la nuance 55Cr3 il existe également à très faibles teneurs (des traces) de quelques éléments dont la présence est involontaire, autrement dit sous forme d'impuretés (P, S, Ni, Ti, Nb, Mo, ...). Ces impuretés ou éléments micro alliés présentent des avantages et des inconvénients selon leurs pourcentages d'existence dans l'alliage.

Le soufre

C'est une impureté qui forme une combinaison chimique FeS insoluble dans le fer. Les inclusions de soufre altèrent nettement les propriétés mécaniques de l'acier ainsi que la soudabilité et la tenue à la corrosion. La teneur en soufre dans l'acier ne doit pas dépasser 0,035%.

Le phosphore

C'est une impureté soluble dans le fer α , il augmente la limite élastique, la charge à la rupture tout en diminuant considérablement la plasticité. Sa teneur ne doit pas excéder 0,045% dans l'acier.

Le niobium(Nb) et le titane(Ti)

Sont des éléments dont l'affinité pour le carbone est très forte et qu'ils forment des carbures solubles seulement à très haute température. Les carbures de niobium (NBC), par exemple, se dissolvent dans l'austénite au-dessus de 1050°C. Lorsque l'on contrôle les températures de laminage et de fin de laminage, ainsi que les vitesses de refroidissement, on peut favoriser l'apparition des carbures très fins (environ 10 nm) et dispersés dans la matrice.

Le rôle de ces carbures est double, en premier lieu, ils empêchent la croissance des grains austénitiques pendant le laminage (le produit final a des grains dont la taille est comprise entre 0,5 et 10 μm) ; en second lieu, puisqu'ils sont très petits et finement dispersés, ils favorisent le durcissement structural.

Le titane(Ti) et le niobium (Nb) ont un avantage pour le traitement thermomécanique des ressorts à lames afin d'augmenter leur limite à la fatigue (meilleure endurance).

II-3-3 influence des éléments d'alliages sur les caractéristiques des aciers [12]

Elément d'alliage		chrome	Silicium	Vanadium
Symbole chimique		Cr	Si	V
Caractéristiques mécaniques	Dureté	↑ ↑	↑	↑
	Résistance	↑ ↑	↑	↑
	Limite d'allongement	↑ ↑	↑ ↑	↑
	Striction	↓	~	~
	Résilience	↓	↓	↑
	Elasticité	↑	↑ ↑ ↑	↑
Vitesse de refroidissement		↓ ↓ ↓	↓	↓ ↓
Résistance à l'usure		↑	↓ ↓ ↓	↑ ↑
Fongibilité		↓	↓	↑
Usinabilité		~	↓	—
Calamination		↓ ↓ ↓	↓	↓
Résistance à la corrosion		↑ ↑ ↑	—	↑

Tableau II-1 : Influence des éléments d'alliage sur les caractéristiques d'acier.

➤ Symboles

↑	Elévation
↓	Diminution
Plusieurs flèches	Influence plus marquée
~	Environ constant
—	Non caractéristique ou inconnu.

II-4. Gamme de fabrication [7] [8]

Composée des opérations suivantes :

- + Débitage ;
- + Formage à chaud de l'œil ;
- + Chauffage pour le cintrage et la trempe des lames ;
- + Revenu des lames trempées ;
- + Poinçonnage de l'étoquiau ;
- + Grenailage (shotpeening).

❖ *Débitage*

Découpage de la matière en différentes longueurs de lames en utilisant le cisailage à froid.

❖ *Formage à chaud de l'œil*

Se fait en deux opérations :

- Formage du premier arrondi qui s'effectue à 850°C, entre poinçon et matrice.
- Formage de l'œil de la lame maitresse ; l'œil est formé, après un chauffage pour la deuxième fois de l'extrémité jusqu'à 1000°C.

Chauffage pour le cintrage et la trempe des lames

Se fait par une cintreuse, on dispose d'une gamme de quatre lames modèles couvrant toutes les courbures nécessaires et on procède, aux opérations suivantes :

- Pose d'une lame modèle, face concave en dessous, sur le jeu des touches inférieures préalablement débloquées ;
- Amener de la traverse supérieure au contact de la traverse inférieure ;
- Déblocage des touches supérieures qui descendent par gravité au contact de la lame modèle ;
- Blocage de toutes les touches après réglage ;
- Remontée de la traverse supérieure ; mise en position « marche » de la commande hydraulique.

 Revenu des lames trempées

Les lames doivent être confectionnées en prenant toutes les précautions nécessaires, à savoir l'état des fours et de surfaces des lames pour éviter la dénaturation de l'acier et naissance de tout défaut (craques, fissures, tapures...etc.) pouvant nuire à leur emploi. Le chauffage des lames qui conduit de manière à éviter toute surchauffe et toute formation importante de calamine. Le cintrage des lames de la trempe est effectuée sur un dispositif maintenant la lame en forme désirée pendant la durée de la trempe sans gêner l'action du liquide de refroidissement.

 Poinçonnage de l'étoquieu

Cette opération consiste à réaliser le trou du boulon central par poinçonnage à la presse. Elle est réalisée à froid pour les faibles épaisseurs et à chaud pour les épaisseurs supérieures

 Grenailage (shotpeening)

Cette opération s'effectue après le revenu permet tout en nettoyant les lames de leurs calamines, d'améliorer leur limite de fatigue.

En effet, pour prolonger la durée de vie des lames à ressort on augmente leur endurance à la fatigue, par un traitement mécanique à froid, dénommé « shotpeening » au moyen d'un jet violent de multitude de petites billes métalliques (grenailage) dures, en martelant la surface de métal, dont l'énergie provoque un écoulement du métal autour des points d'impact.

Les empreintes empiétant les unes sur les autres, toute la surface du métal est soumise à une compression résiduelle sur une profondeur pouvant atteindre 0.5mm. Le travail de déformation de la surface du métal entraîne une modification de l'état d'équilibre des tensions existant à l'intérieur de la pièce. Les couches superficielles sont comprimées, mais les couches sous-jacentes sont soumises à une tension qui va en diminuant avec la profondeur.

Le shotpeening ne diminue pas le fluage, mais augmente considérablement la durée de vie des ressorts soumis à la fatigue, la compression superficielle s'opposant à la naissance de fissures, là où elles pourraient s'amorcer.

II.4.1 Ligne de fabrication des ressorts à lames [7] [9]

La ligne de fabrication est décrite sur l'organigramme suivant :

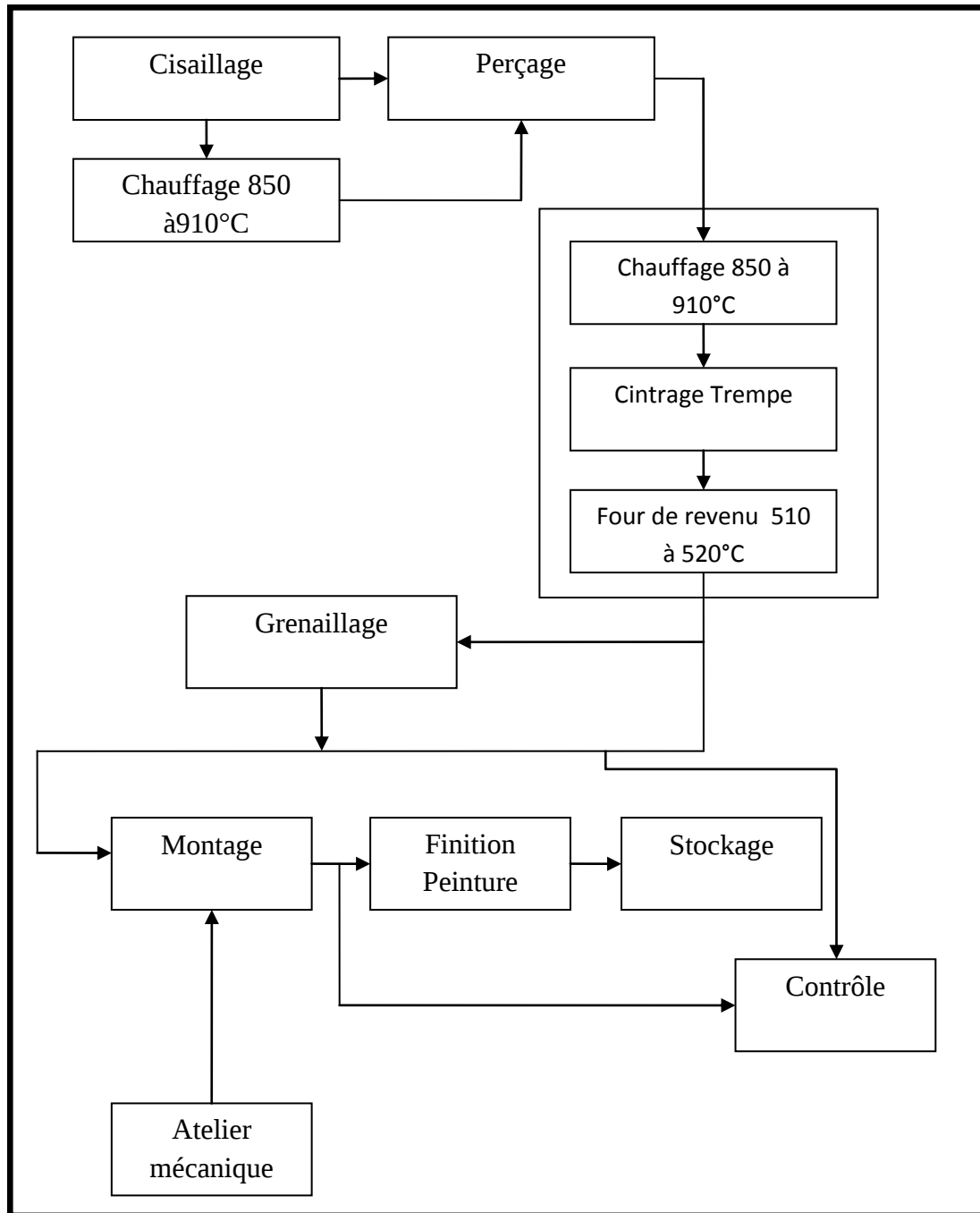


Figure II 3 : Diagramme représentant la gamme de fabrication des ressorts à lame

II.4.2 Ligne de montage des ressorts [7] [8]

➤ **Graissage et assemblage définitif**

- Graisser les lames, une par une, par la graisse graphitée.
- Puis les serrer à l'aide d'un étau hydraulique ou pneumatique.

➤ **Bridage du faisceau à lames**

Se fait par deux opérations :

- Chauffage de la bride jusqu'à 850-900°C ;
- Introduire la bride chauffée dans un faisceau de lames maintenu serré au moyen d'un serre-joint.

➤ **Essai des ressorts sous charge d'épreuve**

Il est posé sur des supports à chariots qui lui permettent de subir sans entraves les déformations provoquées par l'essai.

La charge est appliquée au moyen d'une presse, on relève alors la flèche sous charge d'épreuve et on vérifie sa conformité avec celle exigée par le bureau d'étude.

➤ **Marquage**

Chaque ressort doit porter une référence qui indique :

- le fournisseur
- les pièces interchangeables ;
- la hauteur sous charge d'essai ;
- l'année de fabrication.

➤ **Protection contre la corrosion**

Avec une couche de peinture bitumineuse, d'épaisseur égale à 100 µm après bridage.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié les différents matériaux métalliques conçus pour la fabrication des lames de ressort ainsi que les exigences imposées aux aciers pour assurer un bon fonctionnement de ces dernières.

Chapitre III

Généralités sur la mécanique de la rupture

III-1 Introduction

Les phénomènes de rupture sont extrêmement coûteux. De nombreux essais ont-ils été imaginés pour évaluer la résistance à la rupture des matériaux et certains d'entre eux sont depuis longtemps couramment pratiqués dans l'industrie, il est nécessaire de comprendre les mécanismes de rupture qui interviennent. On mesure alors l'intérêt des essais de choc sur éprouvettes entaillées mis au point notamment par Charpy. Ils permettent, notamment, de déterminer le risque de rupture fragile ou ductile des aciers.

La mécanique de la rupture a pour objet essentiel l'étude des fissures macroscopiques.

III-2 Différents types de rupture [13].

La classification suivante est basée sur la dépendance par rapport au facteur temps et sur les mécanismes élémentaires mis en jeu (reliés à des faciès types). On distingue deux types de ruptures.

- **Ruptures par fissuration rapide :**
 - ductile ;
 - semi-fragile ;
 - fragile.
- **Ruptures après fissuration progressive (suivie d'un stade rapide) :**
 - Sous sollicitation cyclique : fatigue mécanique thermique ;
 - Sous sollicitation statique : corrosion sous contrainte, fluage, etc. ;
 - Sous sollicitation complexe : fatigue-corrosion, fatigue-fluage.

Les propagations peuvent être :

 - Transgranulaires ;
 - Intergranulaires.

III-3 Types rupture élémentaires : fragile et ductile

L'essai de résilience caractérise bien le phénomène de transition ductile-fragile. Il faut en effet bien noter qu'un matériau à un comportement soit ductile, soit fragile, suivant les conditions imposées.

III-3-1 Rupture de type fragile

La rupture fragile est caractérisée par l'absence de la déformation plastique macroscopique, et donc par la propagation très rapide des fissures avec faible consommation d'énergie. Cette propagation peut être de caractère transgranulaire ou intergranulaire.

III-3-1-1 Rupture transgranulaire

La rupture suit des plans cristallographiques bien définis appelés plan de clivages ($\{100\}$ pour les CC, (001) pour les HC).

L'interaction de la fissure avec les défauts structuraux ou avec les hétérogénéités du métal conduit à des microreliefs très caractéristiques :

Les rivières et les languettes (**figure III-1**) et (**figure III-2**).

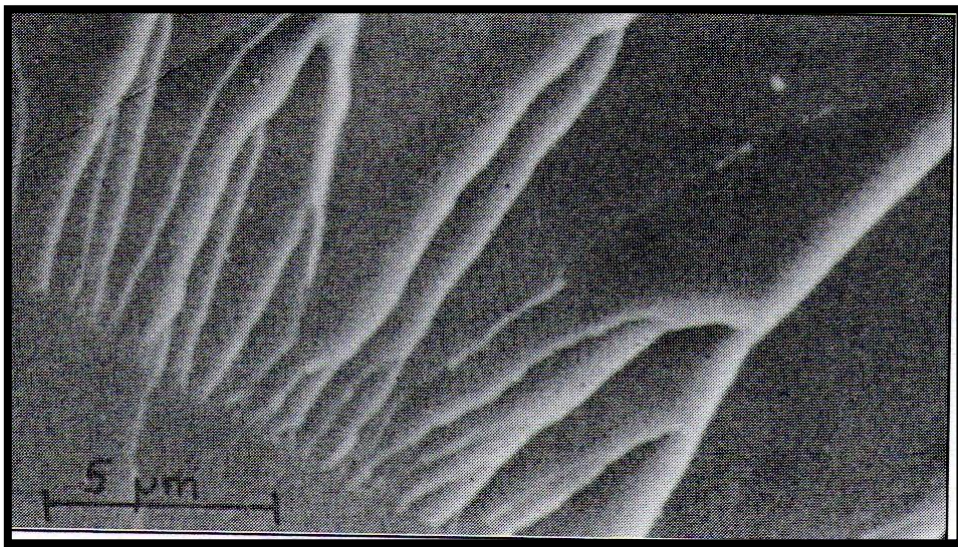


Figure III-1 faciès micrographique : rupture fragile à clivages (rivières)

(MEB)(N.A.Massicot, ENSAM) [13].

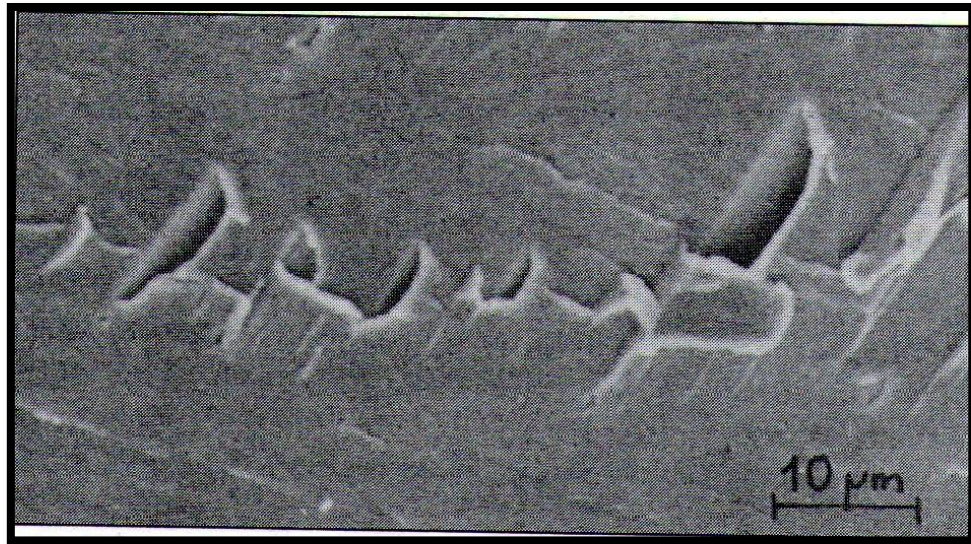


Figure III-2 Faciès microfractographique : rupture fragile à clivage

(Languettes) (MEB)(N.A.Massicot, ENSAM) [13].

Les rivières se forment à l'intersection du plan du clivage et dislocation vis, ou par jonction de deux plans de clivage voisins. Les rivières convergent dans la direction du sens de propagation de la fissure.

Lors du franchissement d'un joint de grain, il ya soit multiplication des rivières si la désorientation est faible, soit réamorçage dans le grain voisin si la désorientation est importante (la propagation est plus difficile dans un matériau à grains fins) (**figure III-3**).

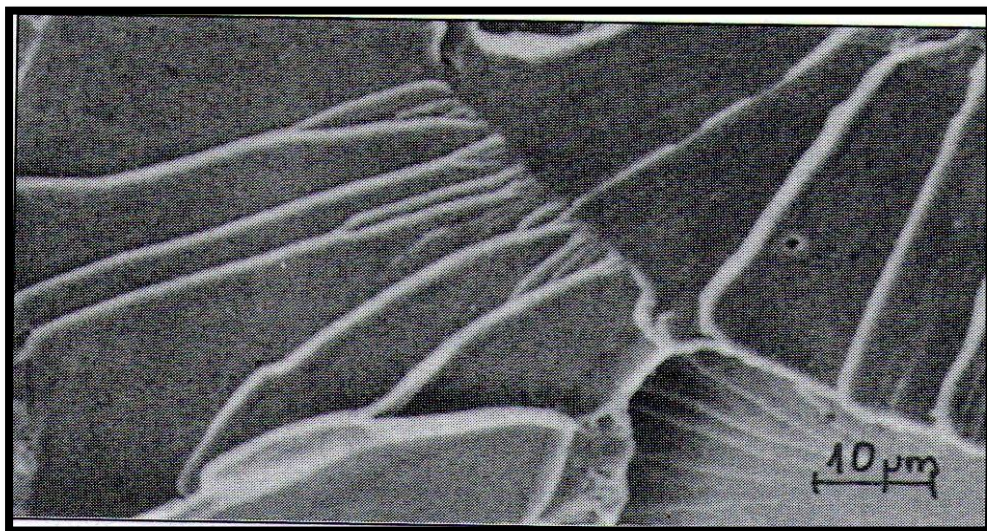


figure III -3 faciès micrographique rupture fragile à clivage (franchissement d'un joint)(MEB)(N.A.Massicot,ENSAM) [13].

III-3 -1-2 Rupture intergranulaire

Il s'agit d'une décohésion intergranulaire, facile à distinguer des clivages intracristallins. Cette décohésion a pour origine une fragilité introduite par exemple par la présence d'une seconde phase au joint de grain (**figure III-4**) ou par la ségrégation d'un élément chimique (exemple : fragilité de revenus des aciers).

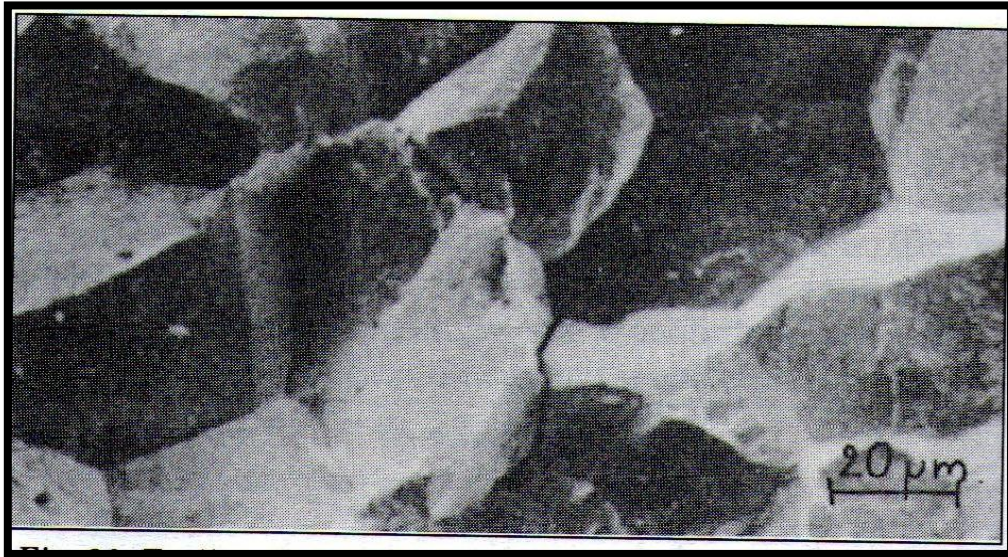


Figure III-4 faciès micrographique : rupture fragile intergranulaire (MEB)

(N.A.Massicot, ENSAM) [13].

III-3-2 Rupture de type ductile [13]

La rupture ductile est liée essentiellement à la présence d'inclusion ou de précipité. Dans ce mode de rupture, la déformation plastique macroscopique est en générale importante (consommation d'énergie élevée). il ya déformation plastique autour des inclusions, formation de microcavités, allongement de ces microcavités dans le sens de la déformation, et coalescence de celles-ci par striction ou cisaillement provoquant ainsi la rupture finale. Cela conduit à la naissance de microreliefs appelés cupules (**figure III-5**). les cupules ont des formes allongées dans la direction de la déformation, ou bien elles sont des formes liées à celle des particules qui leur ont donné naissance (**figure III -6**).

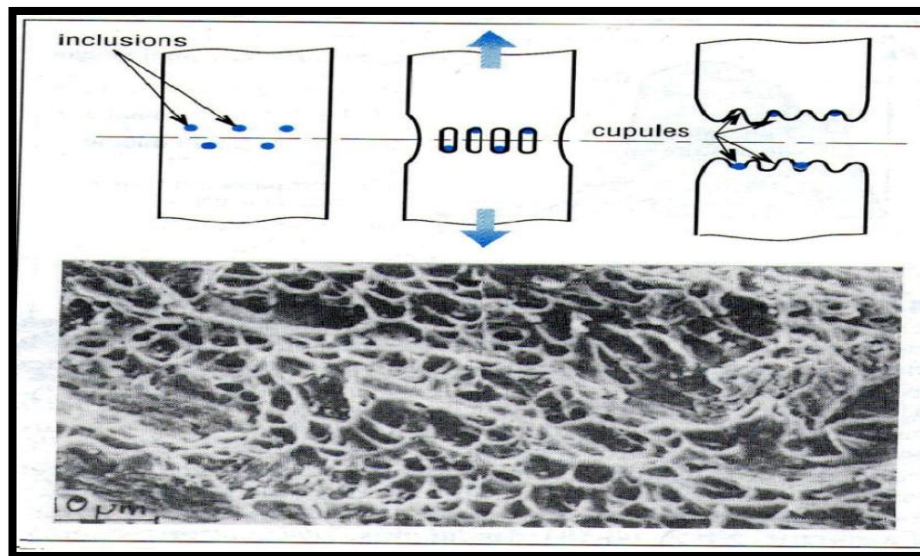


Figure III-5 Rupture ductile : formation de cupules (N.A.Massicot, ENSAM)

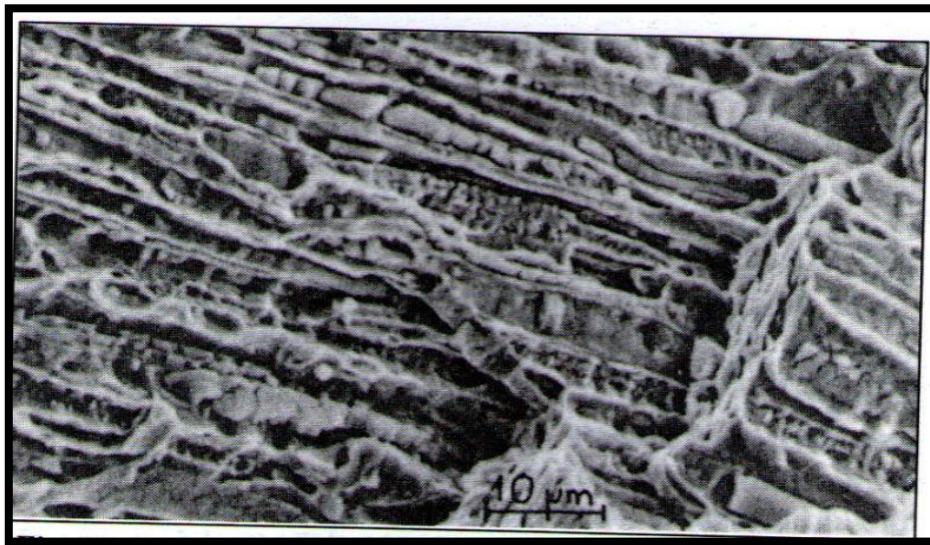


Figure III-6 Rupture ductile en « bois pourri » (MEB) (N.A.Massicot, ENSAM)

La présence de précipités aux joints de grains peut également entraîner un mécanisme de rupture conduisant à un faciès intergranulaire ductile à microcupules.

III-4 Types par fissuration progressive [13] :

Ces types de ruptures correspondent à trois stades :

- Un stade d'amorçage ou d'initiation ;
- Un stade de propagation ;
- Un stade de rupture finale

III-4 -1 Echelle macroscopique [13]

Aux trois stades correspondent trois zones distinctes sur la cassure (**figure III-7**), mais seules apparaissent clairement :

- Une zone lisse « à grain » fin : région de propagation par fatigue en général transgranulaires ;
- Une zone ductile, fragile ou semi- fragile : région de cassure instantanée finale. L'examen de la zone de fissuration progressive permet souvent de situer la ou les zones d'amorçage.

De plus, de nombreuses ruptures en service présentent des lignes d'arrêt qui marquent les arrêtes ou la variation de régime, et dont le foyer correspond à l'amorçage de la fissure. Il peut apparaître également des lignes radiales, dues soit à des décrochements reliant des amorces multiples, soit à des infléchissements du plan de fissuration (**figure III-7**)

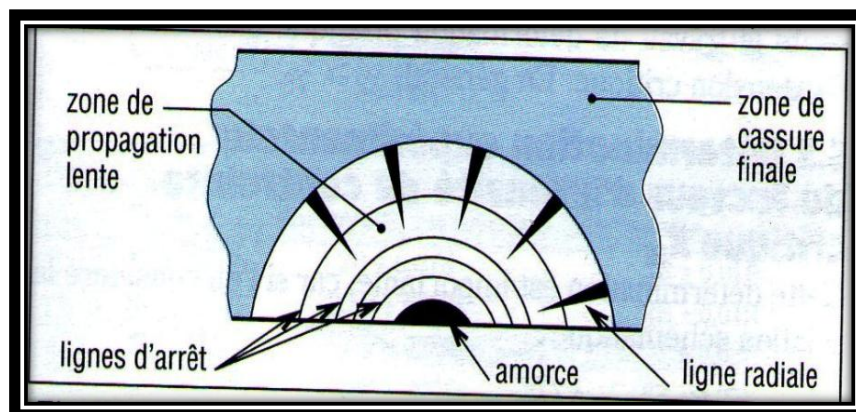


Figure III-7 Aspect macroscopique de la rupture par fatigue

III-4 -2 Echelle microscopique [13]

A l'échelle du microscope électronique, les ruptures de fatigue sont transcristallines et les surfaces sont souvent marquées par des microreliefs appelés stries de fatigue, qu'il ne faut pas confondre avec les lignes d'arrêt. On a pu montrer qu'une strie de fatigue correspond à un cycle de sollicitation (**Figure III-8**).

La présence des stries est une preuve irréfutable de l'intervention d'un phénomène de fatigue, mais leur absence ne signifie pas qu'il n'y a pas eu phénomène de fatigue : elles sont très bien marquées dans le cas des alliages CFC (alliages d'aluminium, aciers

austénitiques), mais beaucoup moins (sinon pas du tout) dans le cas des alliages CC (la plupart des aciers).



Figure III-8 Aspect microscopique de la rupture par fatigue : formation de stries (MEB)
(N.A.Massicot, ENSAM).

III-5 -Mécanique de la rupture et phénomènes de fatigue [13]

La rupture de fatigue se produit suivant trois stades :

- Stade I : phase d'amorçage ;
- Stade II : phase de propagation lente ;
- stade III : phase de propagation rapide $\longrightarrow$ rupture.

La mécanique de la rupture ne peut s'appliquer que lorsque n'interviennent que les stades II et III, c'est –à-dire quand préexistent dans les matériaux des défauts immédiatement propageables (tapure de trempe), fissuration de soudage, défauts en cours de stade II, etc.).

III-6 Modes de propagation d'une fissure [13]

Il existe trois façons d'appliquer une force pour permettre à une fissure de se propager :

- Mode I - Une contrainte de traction normale au plan de fissure,
- Mode II - Une contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et perpendiculaire au front de fissure.

- Mode III - Une contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et parallèlement au front de fissure.

De manière générale, une fissure se propage dans un matériau sous une combinaison de contraintes dans les trois modes (**figure III 9**).

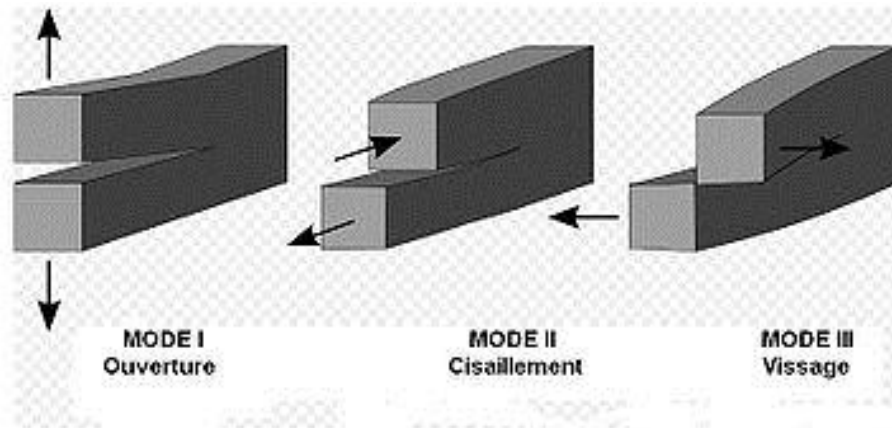


Figure III 9. Illustration des trois modes de propagation d'une fissure.

Chapitre IV

Méthodes et techniques expérimentales

IV-1 Introduction

Toute pièce mécanique subit en service un ensemble de contraintes statiques et dynamiques, dont les plus importants sont : la traction et la flexion.

Pour répondre à cette situation, la pièce mécanique doit posséder des propriétés adaptées aux conditions d'utilisation : haute limite d'élasticité, bonne résilience grande dureté et de la résistance à la fatigue élevées.

Ces caractéristiques mécaniques particulières sont évaluées grâce a plusieurs essais mécaniques mis au point tel que : essai de traction, résilience, dureté, flexion,...

IV-2 Essais mécaniques

Les essais mécaniques les plus répandus pour la caractérisation des lames de ressorts sont :

IV-2-1 Essai de dureté Brinell(HB) [14]

La dureté peut être définie comme la résistance qu'oppose un matériau a sa pénétration par un corps plus dur que lui.L'appareil utilisé et de marque SKF-MAB, permet de travailler en marche manuelle ou automatique.

L'essai consiste à imprimer dans le métal sous une charge P, une bille en acier ou en carbure de tungstène de diamètre D, selon la norme NF A 03 – 152.

Après suppression de la charge et enlèvement de la bille, on mesure les diamètres d de l'empreinte obtenue.la dureté est représenté par HB qui est égale au rapport de la charge P sur la surface, exprimée en daN.

$$HB = \frac{P}{s} = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

HB : duretébrinell ;

P : charge d'essai (N) ;

D : diamètre de la bille (mm) ;

d : diamètre de l'empreinte (mm).

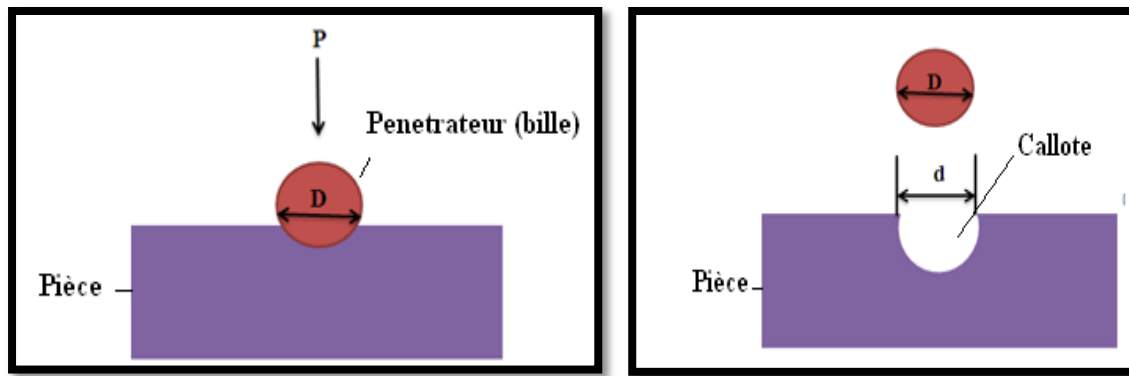
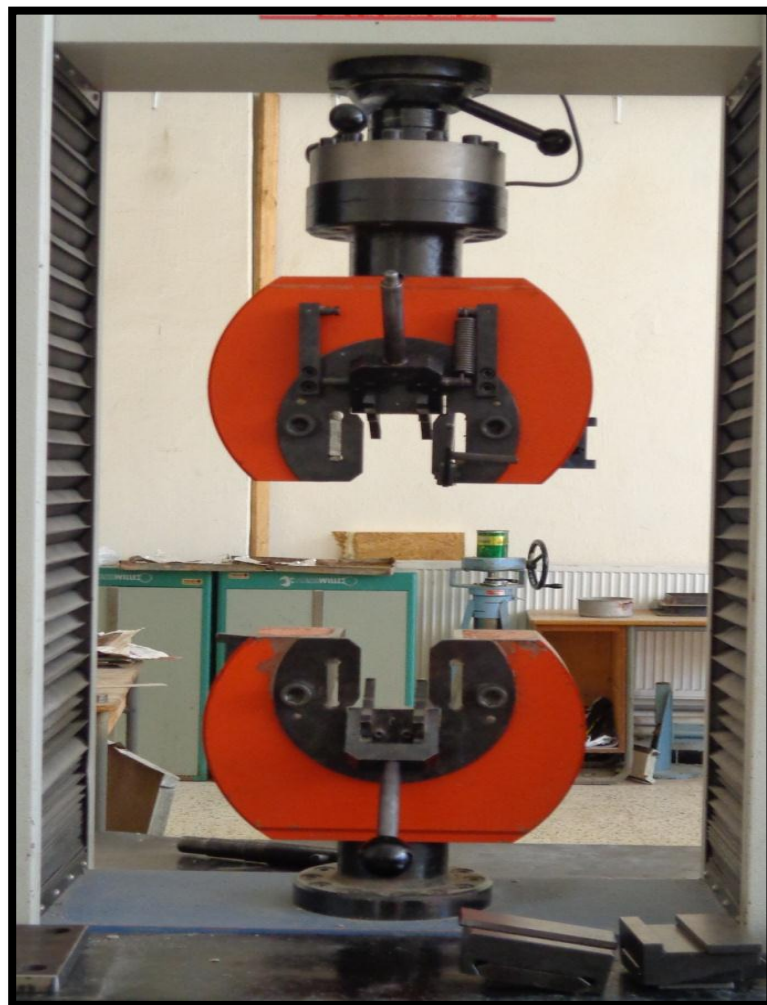


Figure IV-1 : Principe de dureté Brinell

IV-2-2 Essai de traction [14][15]

L'essai de traction a été effectué avec une machine d'essai universelle type IBERTTEST. C'est une machine pour essai de traction, compression et flexion (200kN).

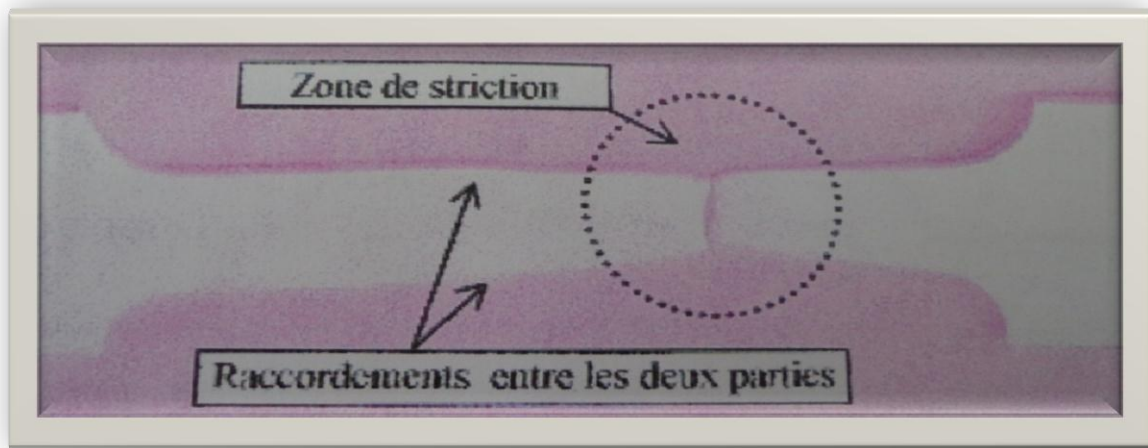


FigureIV-2 : Machine d'essai universelle type IBERTTEST

➤ Principe

L'essai consiste à soumettre une éprouvette à un effort de traction, et cela généralement jusqu'à rupture en vue de déterminer une ou plusieurs caractéristiques mécaniques. Il est défini dans la norme NF EN 10002.

On impose en général une déformation croissante à une éprouvette sur laquelle on a tracé deux repères initialement distants de L_0 , et on mesure simultanément l'effort F et l'allongement $\Delta L = L - L_0$.



FigureIV-3 : Localisation de la zone de striction dans la partie étroite d'une éprouvette à deux corps

Les caractéristiques déterminées sont :

R_m : résistance à la rupture (daN/mm²) ;

Où :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \quad (2)$$

F_m : force maximum (daN)

S_0 : section initial (mm²)

$$A\% = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 = \frac{L_u - L_0}{L_u} \times 100 \quad (3)$$

A : L'allongement pour-cent:

L_u : longueur entre repère après rupture en (mm).

L_o : longueur entre repère correspondant à une éprouvette proportionnelle en (mm)

$$(L_o = K\sqrt{S_0}), \quad K= 5.65$$

L'éprouvette normalisée suivant la norme NF A03-151 est représenté sur la **(figure IV-4)** ci-dessous.

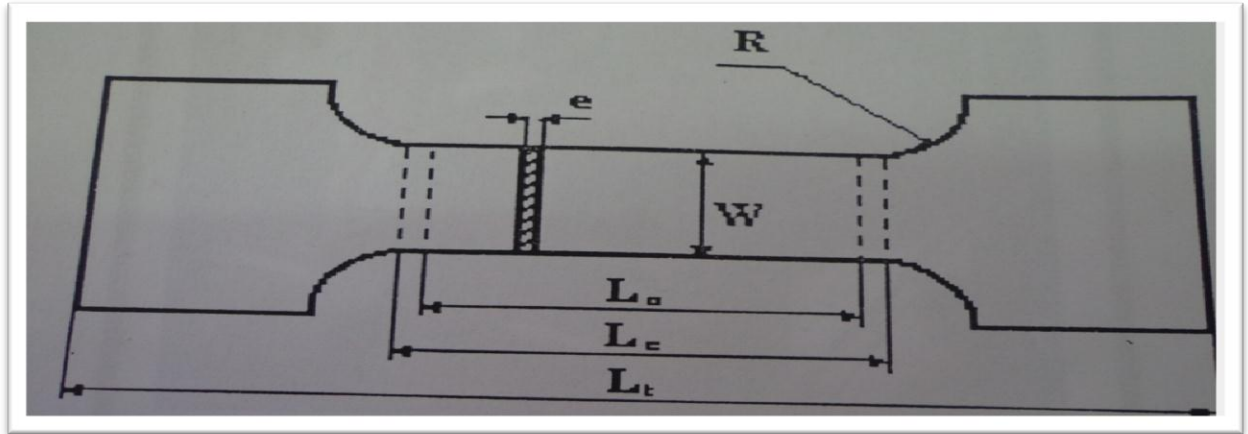


Figure IV -4: Eprouvette de traction

d : diamètre de la partie calibrée (mm) ;

L_c : longueur calibré (mm) ;

L_t : longueur totale (en principe $L_t \geq L_o + 2d$ ou $4d$). (mm)

IV-2-3 Essai de flexion [15]

a) Définition

Essai technologique, très utilisé, permettant de déterminer l'aptitude au pliage d'un métal et sa tendance à la fissuration.

On peut réaliser ce type d'essai soit à la température ambiante, soit à chaud, les éprouvettes étant dans ce cas chauffées à la température désirée.

L'essai de flexion a pour but de contrôler les caractéristiques des ressorts à lames.

b) Principe

Les éprouvettes d'essai sont des barreaux plats ou des bandes de tôles, les dimensions et la forme des éprouvettes ayant une grande influence sur les résultats.

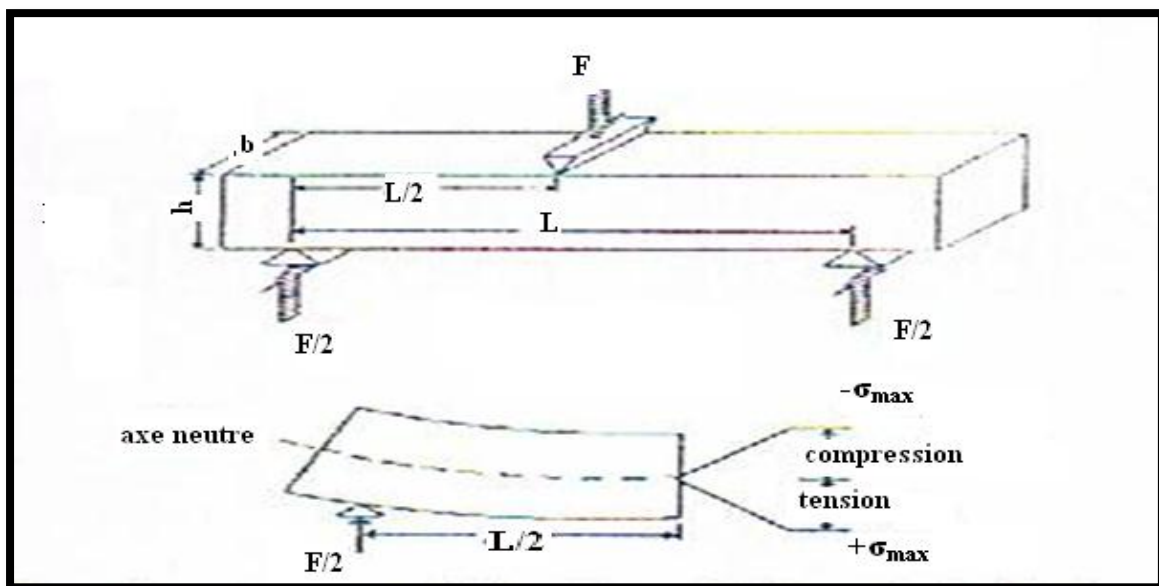
La flexion consiste à appliquer une charge sur l'éprouvette dont elle doit être exécuté lentement et régulièrement jusqu'à rupture de l'éprouvette.

L'essai de flexion trois points et la distribution des contraintes dans le plan où le moment fléchissant et maximal sont représentés dans la (**figureIV-5**).

Les contraintes varient de façon continue de part et d'autre de la fibre neutre, où elles sont nulles. Les fibres du côté concave de l'éprouvette sont comprimées, tandis que celles du côté convexe, sont tendues. La valeur maximale de la contrainte sur les faces extérieures d'une éprouvette à section rectangulaire est donnée, en valeur absolue, par la formule :

$$|\sigma_{\max}| = \frac{3}{2} \left[\frac{FL}{bh^2} \right] \quad (4)$$

Où b est la largeur de l'éprouvette sa hauteur, f la charge appliquée en son centre. La distance entre les appuis est définie par L (entraxe).



FigureIV -5 : Représentation schématique de l'essai de flexion trois points et répartition des contraintes

IV-2-4 Essais de fatigue [16]

Les essais mécaniques ci-dessus cités (Traction - Résilience - Dureté) constituent une étude en statique du matériau. En effet, on cherche le plus souvent à travailler dans le domaine élastique d'un matériau, et une étude statique permet de déterminer la zone élastique. Mais, Lorsque les efforts varient avec le temps, c'est le phénomène de fatigue qui intervient.

Les pièces peuvent rompre même si elles fonctionnent dans le domaine élastique. La fatigue est un affaiblissement progressif qui se manifeste lorsqu'un élément mécanique soumis à une contrainte répétée ou cyclique, comme des vibrations par exemple.

Même lorsque la contrainte maximale ne dépasse jamais la limite élastique, une rupture du matériau peut intervenir, et ce, après un temps relativement court. Avec certains métaux, les alliages de titane par exemple, on peut annuler l'effet de fatigue en maintenant la force cyclique au-dessous d'un certain niveau. Aucune déformation due à la fatigue n'est apparente, mais de petites fissures localisées se développent et se propagent à l'intérieur du matériau jusqu'à ce que la section saine du matériau ne puisse plus supporter la contrainte maximale de la force cyclique.

La connaissance des contraintes de tension, des limites élastiques et de la résistance des matériaux au fluage et à la fatigue sont d'une importance capitale dans l'industrie. La fatigue concerne tous les matériaux et pas uniquement les métaux: Les essais de fatigue peuvent être effectués, par exemple, sur des machines de flexion rotative.

IV-2-5 Essai de résilience [13][14]

➤ Généralités

La connaissance des caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de traction peut être insuffisante, puisque des ruptures peuvent être obtenues pour des contraintes inférieures à la limite d'élasticité dans des conditions particulières qui rendent l'acier fragile.

Les facteurs fragilisants sont :

- Concentration de contrainte liée à la présence d'un défaut ;
- L'abaissement de la température ;
- L'augmentation de la vitesse de déformation ;
- L'augmentation de la dimension des pièces sollicitées.

✓ Définition de l'essai de résilience

C'est l'un des moyens le plus classique et le plus ancien pour caractériser la fragilisation d'un acier sous l'action d'un choc appliqué sur éprouvette entaillée, cet essai est décrit dans la norme NF EN 10045. La résilience est l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, exprimée en joules par centimètre carré.

$$\text{Résilience} = \frac{\text{énergie absorbée par rupture } W \text{ (Joule)}}{\text{section au droit de l'entaille (cm}^2\text{)}}$$

On la note comme suit :

$$K = \frac{W}{S} \quad (5)$$

K : résilience (daJ/cm²) ;

W : énergie absorbée (daJ) ;

S : la section (cm²)

✓ Principe et exécution de l'essai

Il consiste à rompre, d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie W absorbée dont on déduit la résilience.

✓ Machine d'essai

La machine utilisée est le mouton –pendule Charpy pour essai de choc, de capacité 300J (**Figure IV-6**) est celle de l'unité Grue de Bejaia(**UGB**). L'énergie de rupture en joule, de l'éprouvette testée est lue directement sur le cadrans de la machine.

C'est un mouton pendule équipé d'un marteau oscillant dans un plan vertical autour d'un axe (**Figure IV-7**). La masse comporte un couteau destiné à rompre l'éprouvette. L'appareille est équipé d'un système qui permet de mesurer l'énergie absorbée par la rupture de l'éprouvette. Dans ce système, la masse est abandonnée à elle- même a partir d'une hauteur déterminée par construction. L'éprouvette se trouve au point bas.

La masse entraine une aiguille qui se déplace devant un cercle gradué. La mesure de l'angle de remonté, avec et son rupture de barreau, permet de calcule du travail absorbé par cette rupture. L'éprouvette est constitué d'un barreau de section 10mm×10mm, de longueur 55mm, entaillé en son milieu par une entaille en V.

- Le couteau est écarté de la verticale à une hauteur correspondantà une énergie de départ :

$$W_0 = m \times g \times h = 300 \text{ joules}$$

- On libère le pendule et dans sa chute, le couteau brise l'éprouvette.
- On mesure la hauteur à laquelle remonte le pendule pour calculer l'énergie non absorbée :

$$W_1 = m \times g \times h'$$

- On calcule la différence $W_0 - W_1 = m \times g \times (h - h') = W$

Avec :

m : masse du pendule ;

g : apesanteur terrestre ;

h : hauteur initial du pendule ;

h' : hauteur après rupture de l'éprouvette.

La résilience s'exprime en joule ou en joule par centimètre carré (J/cm^2) si en rapporte à la section sous en taille de l'éprouvette, ce qui permet de définir la résilience (ou ténacité) du matériau par :

$$\text{KCV} = \frac{\text{énergie absorbée par la rupture}}{\text{surface sous entaille en cm}^2} = \frac{W_0 - W_1}{S} \quad \left[\frac{\text{joule}}{\text{cm}^2} \right] \quad (6)$$



Figure IV-6 Photo d'un mouton pendule Charpy UGB

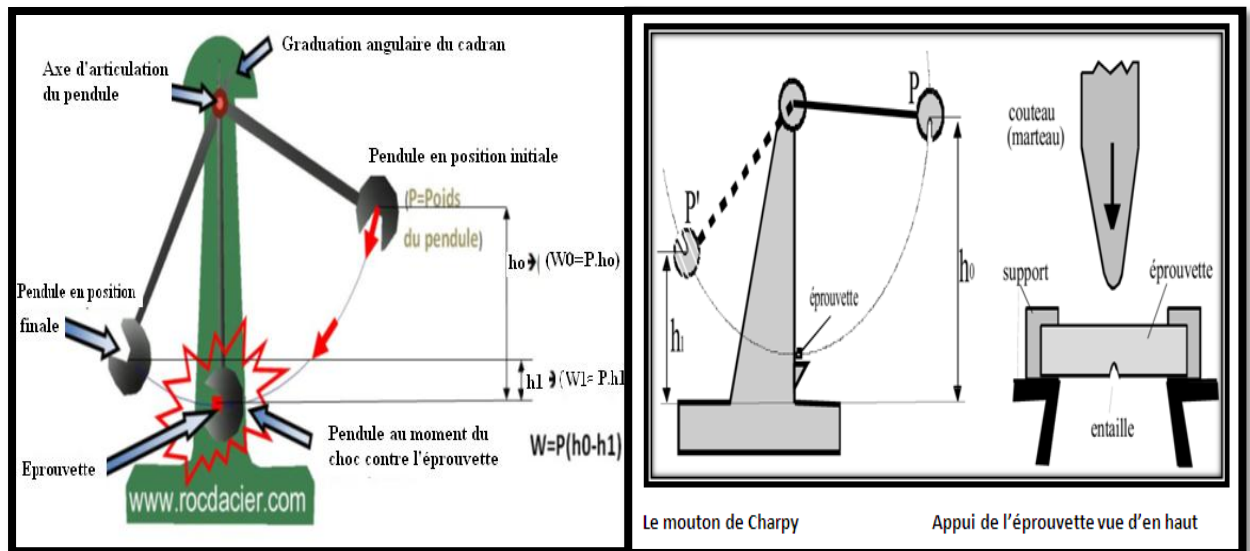


Figure IV -7 : Schéma de principe de l'essai de résilience

✓ Essais Charpy

Les éprouvettes les plus classiques sont définies par la norme. Il s'agit de :

- L'éprouvette Charpy en taillée en U.
- L'éprouvette en taillée en V, appelée couramment Charpy V dite éprouvette KCV. Cette dernière est la plus utilisée

❖ Eprouvettes CHARPY U

Une éprouvette est un barreau usiné de section carrée de 10 mm de côté et dont la longueur est 55 mm. L'entaille de 2 mm de largeur et de 5 mm de profondeur se termine par un fond cylindrique de 1 mm de rayon. La résilience est alors mesurée et précisée selon le symbole Kcu.

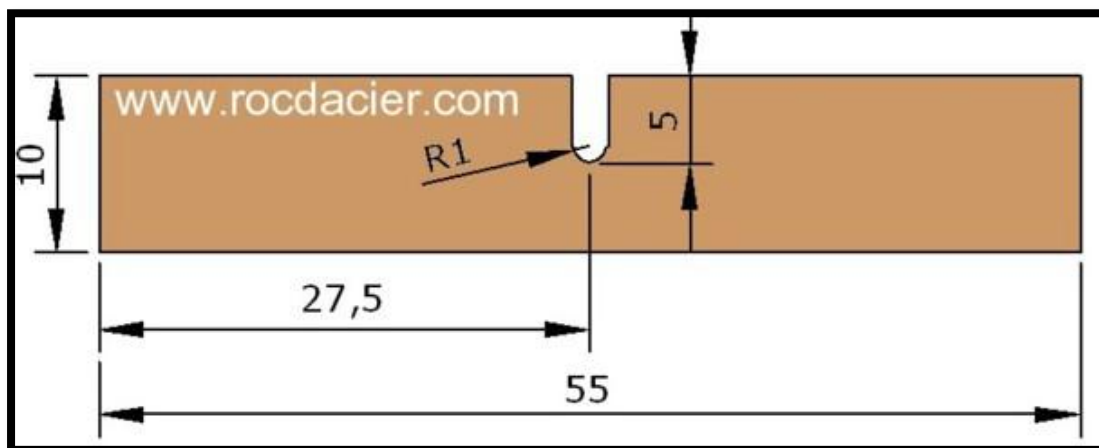


Figure IV-8 Eprouvette Charpy U

❖ **Eprouvettes CHARPY V**

Pour un essai avec une éprouvette Charpy V, l'éprouvette sera entaillée en V de 2 mm de profondeur et avec un angle de 45° dont les dimensions sont les mêmes que pour les éprouvettes Charpy U. On précise par le symbole Kcv l'essai de résilience en V.

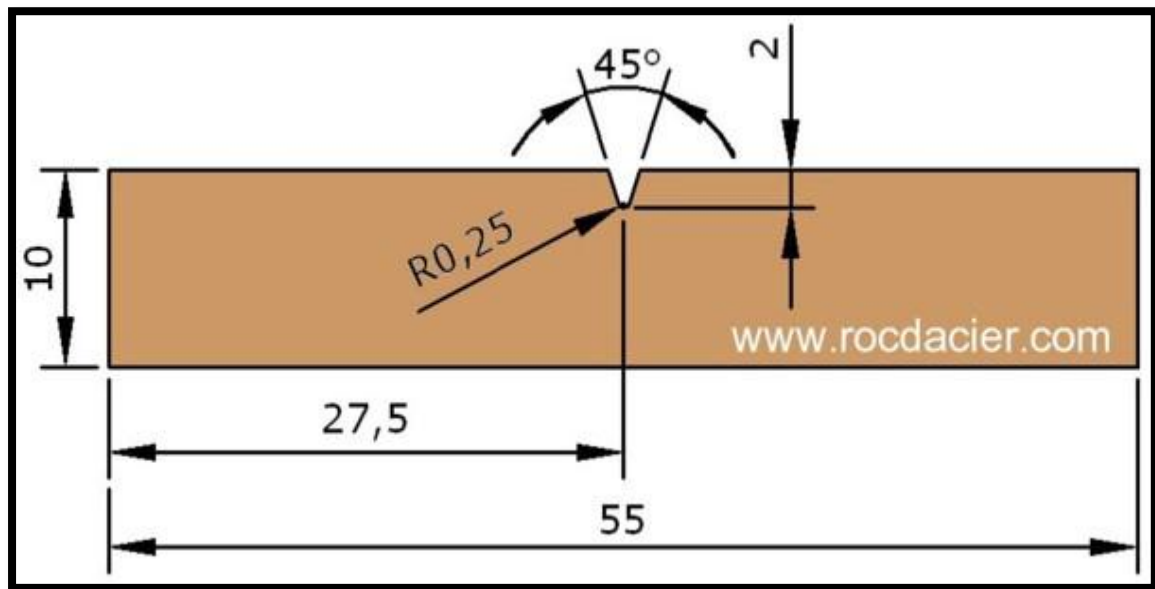


Figure IV-9 Epreuve entaillée en V

❖ **Essai sur éprouvette entaillée en V**

Les symboles et formes d'éprouvettes ce sont :

- La longueur de l'éprouvette : $55\text{mm} \pm 0.6$;
- La hauteur de l'éprouvette : $10\text{mm} \pm 0.06$;
- La largeur de l'éprouvette : $10\text{mm} \pm 0.11$;
- L'angle d'entaille : $45^\circ \pm 2^\circ$;
- La hauteur restant à fond d'entaille : $8\text{mm} \pm 0.06$;
- Le rayon à fond d'entaille : $0.25\text{mm} \pm 0.025$.

Pour le calcul de la résilience Charpy V, on emploie les symboles suivant :

KV = énergie W absorbée par la rupture (en joules) ;

KCV= résilience (en joule par centimètres carré) ;

IV-4- Examen Métallographique [15]**IV-4-1- principes de la micrographie**

La métallographie microscopique ou micrographie a pour but de mettre en évidence les constituants des produits métallographiques (métaux purs, combinaisons, solutions solides, eutectique et eutectoïdes). Pour cela, on procède à l'examen au microscope par réflexion d'une surface polie et généralement attaquée.

IV-4-2 Examen au microscope électronique à balayage (MEB)

L'appareil utilisé pour l'analyse par microscopie électronique à balayage est de type PHILIPS XL30, il est doté d'un système de microanalyse par dispersion d'énergie EDS-X (Energy Dispersive of X-Ray).

Le microscope électronique à balayage MEB est un appareil de très haute résolution dont le système de fonctionnement est comme suite : le canon à électrons génère un faisceau incident d'électrons et le fait accéléré par l'application d'une haute tension et cela dans le but d'augmenter l'énergie du faisceau. L'orientation du faisceau, pour balayer une zone ou bien une portion bien déterminée de la surface de l'échantillon à analyser, est assurée par des bobines (lentilles) qui assurent la déviation du faisceau. Divers rayonnement sont émis lors de l'interaction entre les électrons primaires et la matière.

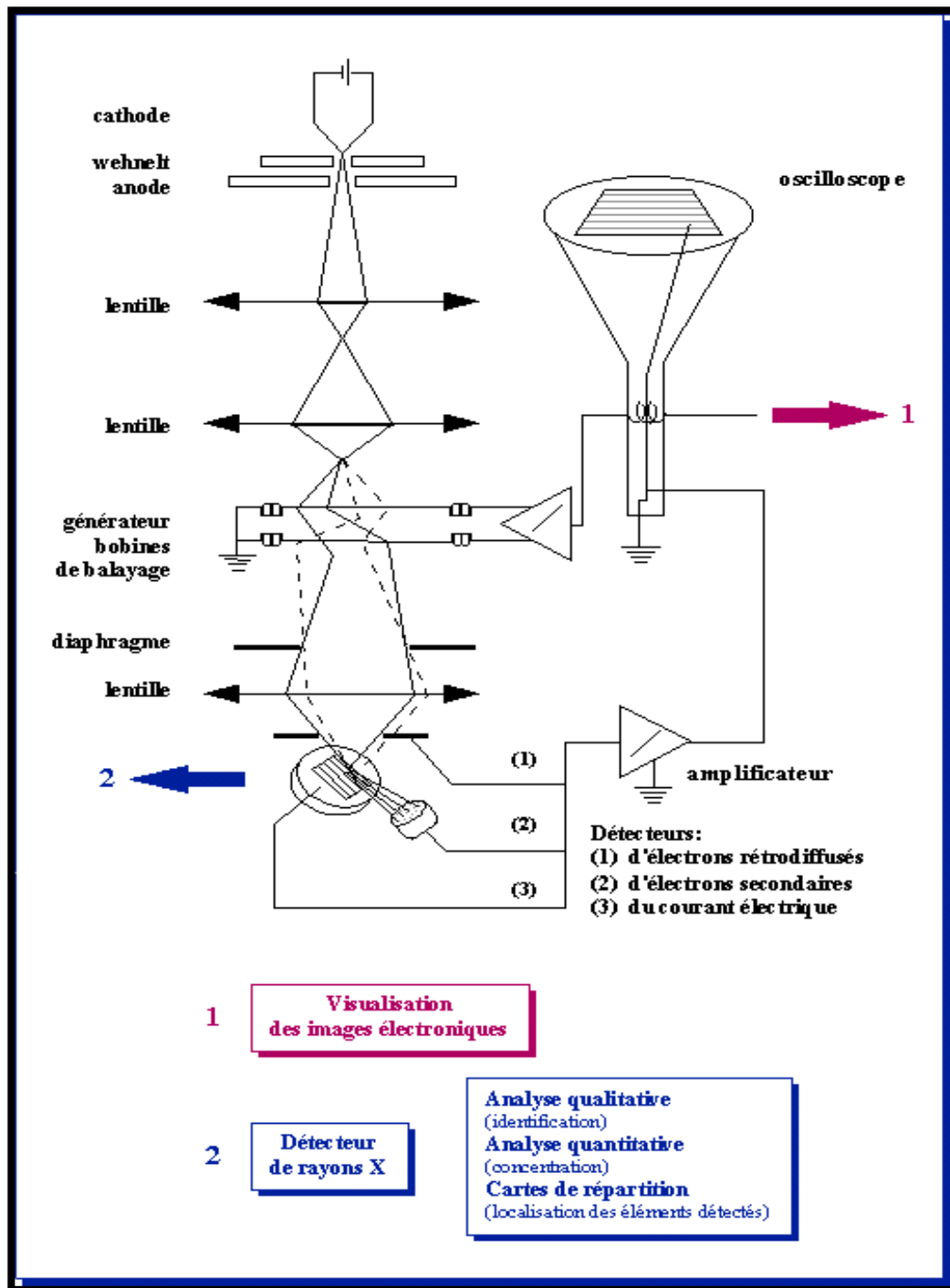
Lorsque le MEB travaille en mode électrons secondaires (SE), cela permet d'obtenir des images de la topographie de l'échantillon. Ces électrons secondaires sont caractérisés par leur faible énergie qui provient de la surface de l'échantillon, tandis que le mode BSE de détection des électrons rétrodiffusés (backscattered electrons) de plus grande énergie et résultant de l'interaction élastique des électrons primaires et des noyaux des atomes, permet d'avoir des contrastes sur des images donnant la répartition des phases. En effet, le coefficient de rétrodiffusion dépend du numéro atomique donc les éléments lourds diffusent d'avantage d'électrons, ce qui produit des zones claires sur la micrographie, contrairement aux éléments légers qui présentent des zones sombres.

Par contre, la détection des rayonnements X qui proviennent de l'excitation des atomes aux niveaux électroniques profonds, permet de faire une analyse chimique élémentaire qualitative et quantitative. En effet, le retour à l'équilibre par transition des électrons des niveaux supérieurs vers les niveaux excités provoque l'émission d'un rayonnement X caractéristique de l'atome.

Le MEB est commandé par deux microordinateurs sur lesquels sont installés les logiciels de commande du microscope et ceux d'acquisition et de traitement des résultats.

➤ Equipement

Le microscope électronique à balayage comporte :



FigureIV -10. Représentation schématique d'un microscope électronique à balayage équipé d'un système de microanalyse de rayons X.

IV-5 Analyse chimique [17]**IV-5-1 Analyseur du carbone LECO****❖ Principe de mesure**

Un circuit gaz, en boucle fermée est rempli à 100% d'oxygène sous une pression de 4PSI (0.28kg /cm²), circulant sous l'effet d'une pompe lors de la combustion d'un échantillon, il se forme approximativement 97% de CO₂ et 3% de CO (on le fait pour de faibles teneurs en carbone, il se forme très peu de CO) de même la présence du fer de l'échantillon et du cuivre de l'accélérateur entraîne la formation des oxydes.

Un catalyseur transforme le CO en CO₂ et la concentration à l'intérieur de la boucle devient rapidement homogène. La détection est basée sur l'absorption par CO₂ de l'infrarouge émise par un filament en Nichrome chauffé aux environs 850°C.

Le détecteur est un semi-conducteur de type pyro électrique, un filtre sélectif permet la transmission de la longueur d'onde du CO₂ (à 4,3 μ m).

Une seule cuve de mesure est utilisée pour la référence et la mesure se fait grâce à des circuits électroniques appropriés. En présence d'oxygène pur le maximum d'énergie arrive au détecteur en présence de CO₂.

Cette énergie décroît, elle traite électriquement et affiche les valeurs au voltmètre sous forme de pourcentage de carbone. Lorsque la variation en concentration de CO₂ à l'intérieur de la boucle devient nulle le four est automatiquement coupé et l'analyse est déterminée.

Le système est alors purgé par l'oxygène, le détecteur lui-même suit la concentration en CO₂ et s'interrompt à un niveau acceptable.

IV-5-2 Analyse des autres éléments par le spectromètre d'émission [17]

A l'aide d'un spectromètre électronique, on peut faire une analyse de surface de l'échantillon préalablement poli. L'échantillon est irradié par un rayonnement (h) issu d'une source d'excitation.

Les intensités des photoélectrons sont proportionnelles à la concentration des éléments (par étalonnage : à chaque élément chimique correspond un spectre de raie spécifique) et à l'aide d'un système de calcul informatique, on obtient le pourcentage de chaque élément recherché.

Conclusion

Nous avons constaté dans ce chapitre que pour chaque sollicitation simple, il existe un essai particulier réalisé sur une éprouvette du matériau considéré.

L'essai de traction demeure la façon la plus usuelle pour connaître les caractéristiques mécaniques des matériaux.

La connaissance de ces propriétés s'avère insuffisante dans certaines conditions de sollicitations. Pour la compléter un essai de résilience effectué pour caractériser la fragilisation d'un acier sous l'action d'un choc.

Chapitre v

Etude expérimentale et discussion des résultats

V-1 Introduction

Ce travail porte sur la caractérisation de l'anisotropie de résilience de l'acier 55Cr3 pour ressort à lames. Dans ce chapitre, nous allons vous présenter les résultats issus d'essais menées dans le but de caractériser notre matériau.

V.2 Le matériau d'étude

Nous avons utilisé une lame maîtresse du ressort à lames multiples de l'acier 55Cr3 de la suspension du camion K66, qui présente une forme parabolique pour permettre la superposition en étage des lames secondaires en vue de monter la suspension dénommée "ressort à lames multiples". Cette lame est initialement découpée à partir d'une tôle forte laminée donc écrouie au préalable. Dans la phase finale cette lame subit un cintrage à chaud pour donner la forme parabolique.

V. 3 Constituants de matériau

V.3.1 Analyse de la composition chimique

Des analyses au spectromètre de masse d'un échantillon prélevé à partir de la lame maîtresse de nuance 55Cr3 a donné les résultats présentés dans le tableau V.01 effectué au laboratoire central du complexe véhicules industriels de Rouïba. La teneur en carbone est déterminée à l'aide de l'analyseur de carbone de marque LECO.

Tableau V.01 : Résultats de l'analyse chimique de l'acier prélevé de la lame maîtresse du ressort à lames multiples de l'acier 55Cr3 de la suspension du camion K66.

Eléments	Teneur en %	AFNOR NF-A-35-571
C	0,56	O, 52 -0,59
Cr	0,92	0,70-1,00
Si	0,303	0,10-0,40
Mn	0,9	0,70-1,00
S_{max}	<0,1 0,0081	0, 025
P_{max}	<0,1 0,012	0, 025

La colonne 3 du tableau présente selon la norme NF A35-571, les fourchettes des éléments chimiques qu'il ne faut pas dépasser pour garantir la conformité de la nuance de l'acier 55Cr3 (les pourcentages sont exprimés en poids %). Les teneurs en chrome, silicium, carbone et manganèse sont à l'intérieur des fourchettes exigées par la norme AFNOR.

V.3.2 Influence des éléments d'additions

Les éléments présents dans l'acier sont le C, Cr, Si, Mn, S et P (tableau V.01).

a) Carbone

C'est le principal élément d'alliage de l'acier. Il existe dans l'acier recuit à l'état de solution dans la ferrite, et surtout sous forme de carbures de fer Fe_3C (cémentite) pour les aciers ordinaires et les aciers faiblement alliés.

b) Chrome

Le Chrome augmente la trempabilité: le domaine de transformation martensitique pourra être atteint avec de plus faibles vitesses de refroidissement. Des aciers au chrome pourront être trempés à l'huile ou même à l'air. Le chrome augmente également la résistance au revenu: lorsque l'acier, après la trempe, est soumis à un revenu, il s'adoucit plus lentement et à de plus hautes températures. Des propriétés importantes du chrome sont de donner à l'acier une bonne résistance à la corrosion, il a une grande affinité pour le carbone avec lequel il donne des carbures plus durs que la cémentite, aussi accroît-il la dureté, la résistance à la traction et la résistance à l'usure, mais sans augmenter la fragilité. On emploie le chrome dans les aciers de cémentation lorsqu'on veut améliorer la résistance à l'usure des surfaces carburées.

c) Manganèse

Le manganèse intervient également dans tous les aciers comme désoxydant. Dans les aciers alliés, il se comporte, dans un certain sens, comme le nickel; il augmente la trempabilité et a tendance à se dissoudre dans la ferrite.

d) Silicium

Le silicium se rencontre dans tous les aciers, avec de faibles teneurs, de l'ordre de 0,2 à 0,5%: il est alors utilisé comme désoxydant. Il intervient parfois comme élément d'alliage avec de plus fortes teneurs, soit pour améliorer la limite élastique, soit pour accroître la résistance à l'oxydation. Comme le chrome.

e) Le phosphore

Augmente fortement la trempabilité et la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité de revenu.

V-4 Réalisation des éprouvettes de résilience entaillée en V

V.4.1 découpage des éprouvettes

Nous avons prélevé nos éprouvettes de résilience selon les trois directions recommandée par la bibliographie :

Direction de laminage notée D_L dénommé sens long, à 45° par rapport à D_L et à 90° par rapport à D_L dénommé "sens transverse".

Pour mieux détailler cette anisotropie compte tenue de la grande largeur de la lame, nous avons prélevée trois autres types d'éprouvettes : deux éprouvettes vers les bords et une éprouvette au milieu.

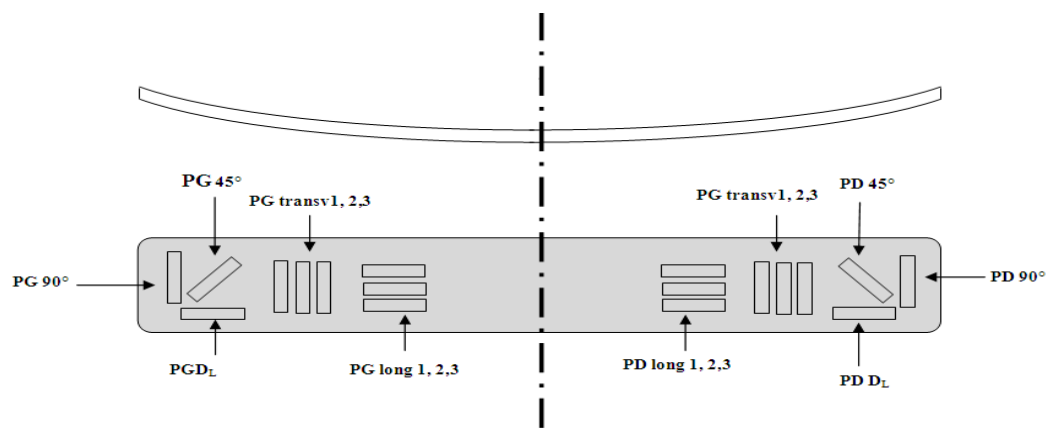
Ces trois types d'éprouvettes sont dénommés horizontal supérieur et horizontal inférieur pour respectivement celles prélevées dans les deux bords et horizontal milieu pour l'éprouvette du milieu.

Par ailleurs pour mettre en évidence s'il existe un effet du cintrage à chaud de la lame pour lui donner sa forme parabolique (rayon de courbure variable tout le long de la longueur), nous avons considéré deux parties de la lames par rapport à son milieu : partie gauche et partie droite.

De plus pour examiner s'il y a une sensibilité de l'effet de la variation du rayon de courbure tout le long de la lame, nous avons également prélevé trois autres types d'éprouvettes perpendiculairement à D_L (sens transverse) dans d'autres zones de la partie gauche et de la partie droite. Dans la suite, ces éprouvettes sont notées :

Sens transverse 1, sens transverse 2 et sens transverse 3.

Le schéma ci-dessous représente localisation de prélèvement des éprouvettes :



V-4.2 Usinage et dimensions des éprouvettes normalisées

Cette opération a été réalisée à l'aide d'une fraiseuse au hall technologie de L'U.M.M.T.O, on a déterminé les dimensions qui répondent aux normes d'éprouvette de résilience qui est constituée d'un barreau de section 10mm*10mm, de longueur 55mm entaillé en son milieu par une entaille en V (**Figure V.1**).

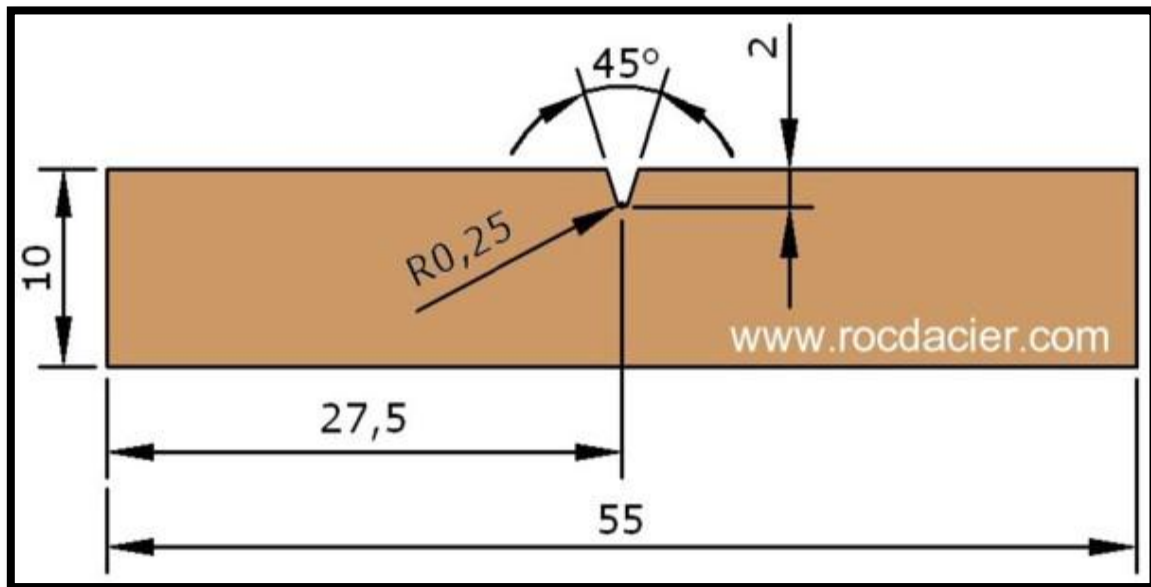


Figure V-1 : Epreuve de résilience entaillé en V.

V-5 Essais de résilience :

Dans le but de mettre en évidence l'anisotropie de la résilience de l'acier 55Cr3 sur les éprouvettes réalisées, On a du se rendre à l'unité Grue de Bejaia (UGB), Dans le laboratoire des essais mécaniques, équipé du mouton –pendule Charpy de capacité 300J, le principe de cet essai est illustré dans la (**Figure V-2**).

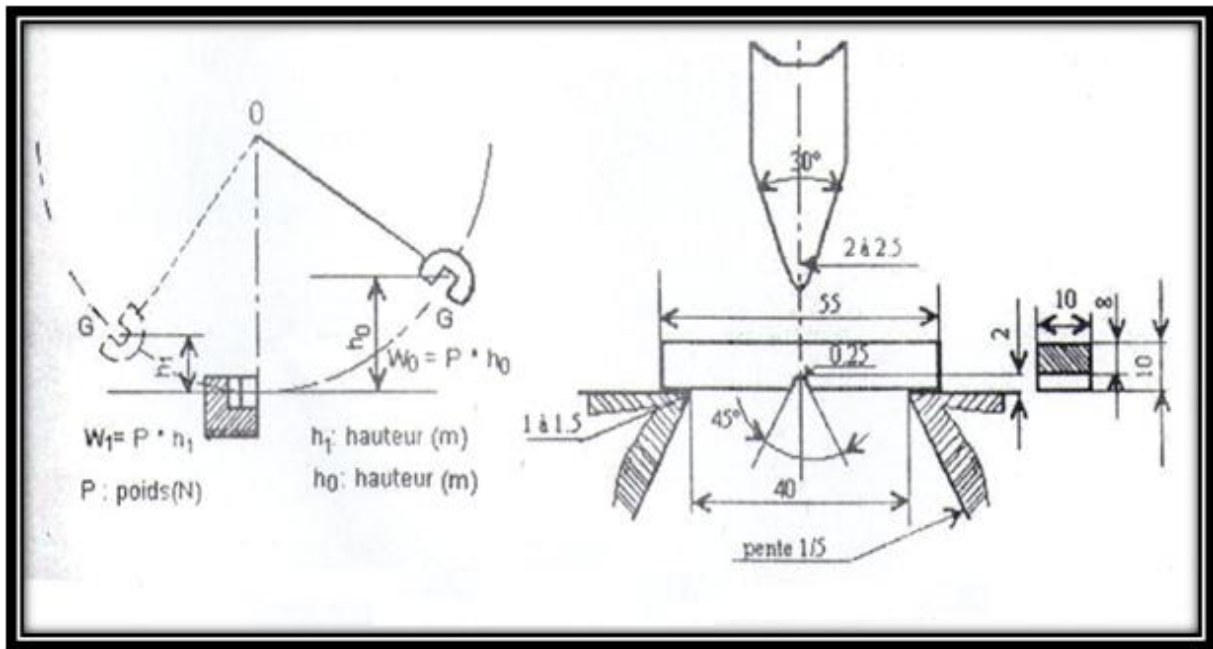


Figure-2 : Schéma du principe de l'essai de résilience

V-5.1 résultats de l'essai de résilience

Les résultats de l'essai de résilience sont portés dans le tableau ci- dessous

Tableau V-02 : Résultats de l'essai de résilience de la partie gauche et de la partie droite de la lame maîtresse selon les différentes directions de prélèvements.

Sens de la découpe de l'éprouvette	L'énergie absorbée pour rompre l'éprouvette (Joule : J)		Section sous entaille (cm ²)	Résilience KCV (J/Cm ²)	
	Partie gauche	Partie droite		Partie gauche	Partie droite
Sens de laminage (D _L)	29	29	0.8	36.25	36.25
à 45° par rapport D _L	19	16.5	0.8	23.75	20.63
Sens transverse	16	14	0.8	20.00	17.50
Horizontal supérieur	33	13	0.8	41.25	16.25
Horizontale milieu	30	38	0.8	37.50	47.50
Horizontal inférieur	39	29	0.8	48.75	36.25
Sens transverse -1-	11	27.5	0.8	13.75	34.38
Sens transverse -2-	13.5	14	0.8	16.88	17.50
Sens transverse -3-	18	15	0.8	22.50	18.75

V.5.2 Interprétation des résultats

Le tableau V.02 rassemble les résultats de la résilience obtenus selon les directions de prélèvement et pour les deux plaquettes issues de la lame maîtresse (côté gauche et côté droit). On remarque la présence notable d'une forte anisotropie selon la direction de prélèvement. Nous constatons également que pour les deux côtés de la lame maîtresse (partie gauche et partie droite par rapport au milieu de la lame), les valeurs de la résilience sont tout à fait différentes avec un écart notables sauf pour la direction de laminage où les valeurs sont identiques.

Si l'on considère seulement les trois directions "Sens transverse", à 45° et "sens de laminage" D_L , l'anisotropie est bien mise en évidence avec une meilleure résilience, donc une meilleure ductilité selon D_L . C'est le sens transverse qui présente la plus faible résilience. La comparaison des valeurs entre les deux parties gauche et droite montrent des valeurs différentes pour les deux directions sens transverse et à 45° .

De plus, on remarque que pour la partie gauche, la résilience augmente du sens transverse vers le sens à 45° (20 à 23.75 J/Cm^2) alors qu'elle diminue dans la partie droite (17.50 à 20.63 J/Cm^2). Ceci laisse supposer qu'il y a un effet sensible du rayon de courbure imposé lors du cintrage à chaud de la lame. Par contre, il est intéressant de noter que la résilience est identique dans le sens de laminage D_L . Ceci est tout à fait logique du fait que lors du laminage, l'écoulement de matière (déformation plastique) est prépondérant dans cette direction D_L induisant un écrouissage homogène.

Pour le cas des éprouvettes prélevées dans des zones selon l'épaisseur de la lame (horizontal supérieur, horizontal milieu et horizontale inférieur), l'anisotropie est notable dans les deux parties gauche et droite. Ceci dénote de l'existence de l'effet du rayon de courbure de la lame. Le même constat est mis en évidence pour le cas des éprouvettes sens transverse 1, 2 et 3. Cependant pour ce cas, la partie droite est fortement anisotrope comparée à la partie gauche. En effet, la partie droite présente une valeur maximale de 34 J/Cm^2 et une valeur minimale de 17 J/cm^2 contre respectivement 13 J/cm^2 et 16 J/Cm^2 pour la partie gauche.

V.6 Analyse des faciès de rupture

V-6.1 Observation microscopique électronique à balayage (MEB) de l'acier 55Cr3 après rupture:

Pour mieux comprendre cet effet d'anisotropie en comportement aux chocs de la lame maîtresse du ressort multiples du camion K66 fabriquée à partir de l'acier 55Cr3, nous avons examiné les faciès de rupture de nos éprouvettes après essais de résilience au microscope électronique à balayage en utilisant l'imagerie en électrons secondaires.

Les faciès de rupture concernées par ces observations sont celle des éprouvettes "sens transverse" (prélevée perpendiculairement à la direction de laminage DL), "à 45° par rapport à DL" et dans le "sens de laminage de laminage" D_L dans les deux parties gauche et droite. Pour faciliter la comparaison entre les différents faciès, nous avons utilisé un même grossissement de $5\mu\text{m}$ pour l'ensemble des faciès observés.

Ces faciès nous permettront de connaître le type de rupture fragile ou ductile, et direction de la propagation de la fissure.

Après observation des faciès de rupture sous le **MEB** nous avons obtenu les images suivantes :

✚ Faciès de rupture dans le sens de laminage D_L

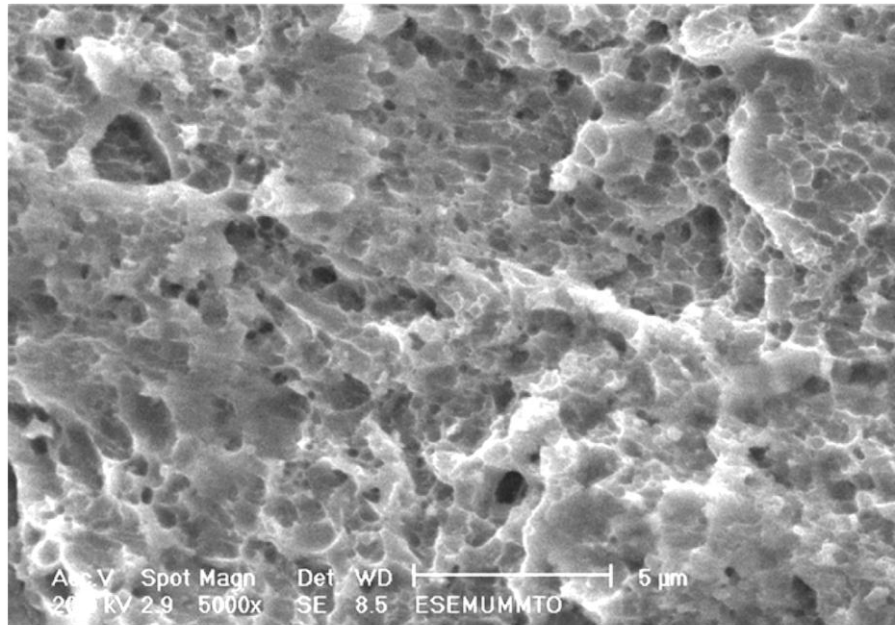


Figure V. 3 : Faciès de rupture de l'éprouvette prélevée dans le sens de laminage D_L et dans la partie gauche de la lame maîtresse ($36,25 \text{ J/Cm}^2$).

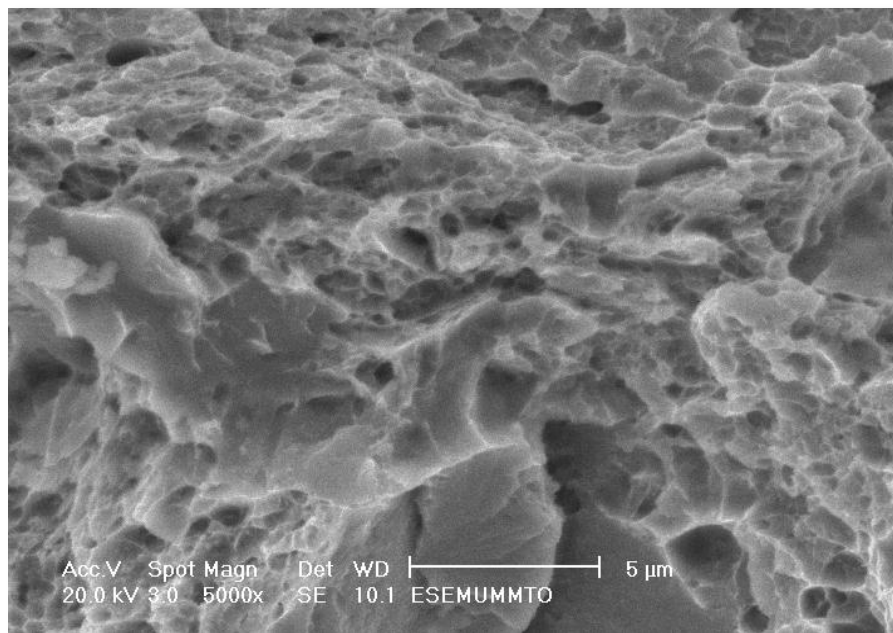


Figure V. 4 : Faciès de rupture de l'éprouvette prélevée dans le sens de laminage D_L et dans la partie droite de la lame maîtresse ($36,25 \text{ J/Cm}^2$).

➤ **discussion des résultats**

Les figures V.3 et V.4 représentent le faciès de rupture des deux éprouvettes prélevées dans le sens de laminage D_L et respectivement pour la partie gauche et pour la partie droite de la lame maîtresse. Dans les deux cas, le faciès est composé de cupules de différentes tailles caractéristique d'un mode de rupture ductile. Ce mode de rupture résulte de la naissance de cavité (cupules), puis de leur croissance et de leur coalescence sous l'effet de la déformation plastique. Si ces cavités se présentent sous différentes tailles, c'est que la taille des grains n'est pas tout à fait homogène (chaque cupule représente la déformation plastique jusqu'à rupture de chaque grain)

Cependant pour l'éprouvette issue de la partie droite de la lame maîtresse, son faciès de rupture présente des zones lisses exemptes de cupules (Figure V.4). Ces zones sont liées à un mode de rupture fragile. Avec l'obtention des mêmes valeurs sur la résilience ($36,25 \text{ J/Cm}^2$) pour les deux éprouvettes, nous pouvons dire que la présence de ces zones lisses n'ont aucune influence sur la résilience (ductilité) dans le sens de laminage de la lame. Ceci est dû probablement au fait que ces zones soient très minoritaires par rapport aux zones à cupules. Par exemple, sur cette figure V.4, la surface totale des zones lisses représente en moyenne 25% de la surface totale c'est à dire 75% de surface à cupules

✚ **Faciès de rupture dans le sens à 45° par rapport à la direction de laminage D_L**

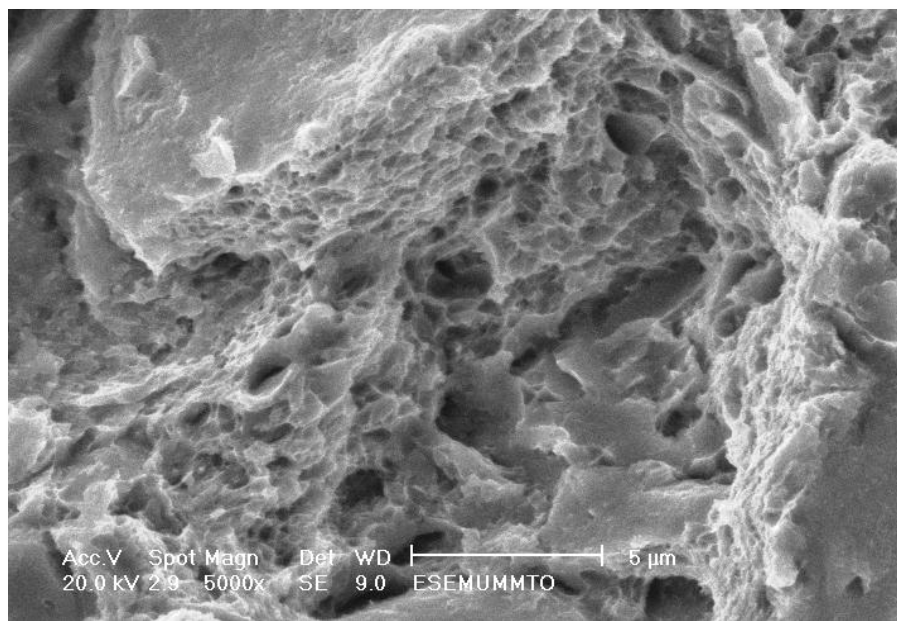


Figure V. 5 : Faciès de rupture de l'éprouvette prélevée dans le sens à 45° par rapport à D_L et dans la partie gauche de la lame maîtresse ($23,75 \text{ J/Cm}^2$).

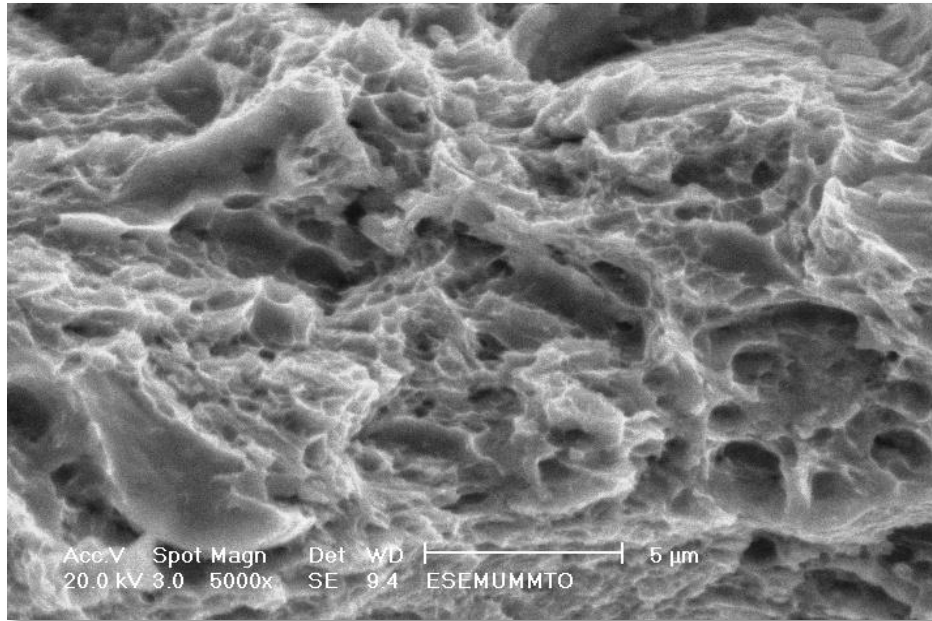


Figure V. 6 : Faciès de rupture de l'éprouvette prélevée dans le sens à 45° par rapport à D_L et dans la partie droite de la lame maîtresse ($20,63 \text{ J/Cm}^2$).

➤ **discussion des résultats**

Les figures V.5 et V.6 représentent le faciès de rupture des deux éprouvettes prélevées dans le sens à 45° par rapport à la direction de laminage D_L et respectivement pour la partie gauche et pour la partie droite de la lame maîtresse. Comme pour le cas précédent (sens de laminage), nous constatons que pour la partie gauche et partie droite de la lame maîtresse, le faciès est composé en grande majorité de zones à cupules qui caractérisent un mode de rupture ductile. Les deux faciès sont également composés de zones lisses représentant des zones fragiles. Ces zones sont plus importantes dans l'éprouvettes de la partie gauche de la lame (figure V.5) que dans celle de la partie droite bien que la résilience est plus importante du côté gauche ($23,75$ contre $20,63 \text{ J/cm}^2$) ceci nous amène à dire que la résilience (ductilité) dans ce cas est gouverné par le mode de rupture fragile compte tenu surtout que nous avons déjà fait le constat dans le cas précédent (sens de laminage) que ces zones lisses n'avait aucune influence sur la valeur de la résilience (même valeur de la résilience avec présence de zones lisses minoritaires dans une seule éprouvette).

Il est cependant remarquable que malgré une surface de zones lisses plus faible dans le cas de l'éprouvette issue de la partie droite (Figure V.6) la résilience est plus faible. Ceci s'explique par le fait que le faciès à cupules est plus grossier que dans le cas de l'éprouvette issue de la partie gauche (Figure V.5). Les grosses cupules trouvent leur origine dans une

structure initiale à gros grains de l'acier et il est connu qu'un acier à gros grain est moins résistant qu'un acier à grains fins.

Faciès de rupture dans le sens transverse

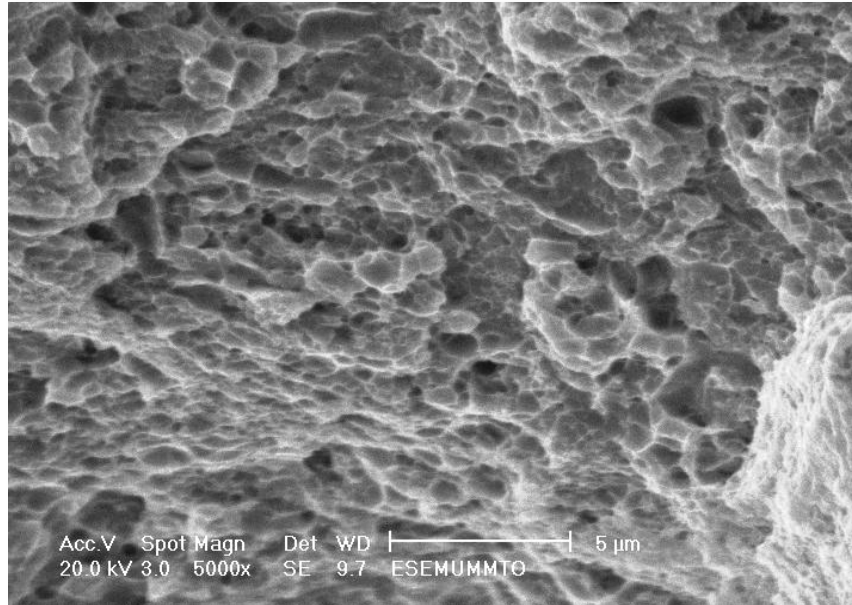


Figure V. 7 : Faciès de rupture de l'éprouvette prélevée dans le sens transverse et dans la partie gauche de la lame maîtresse (KCV=20 J/Cm²).

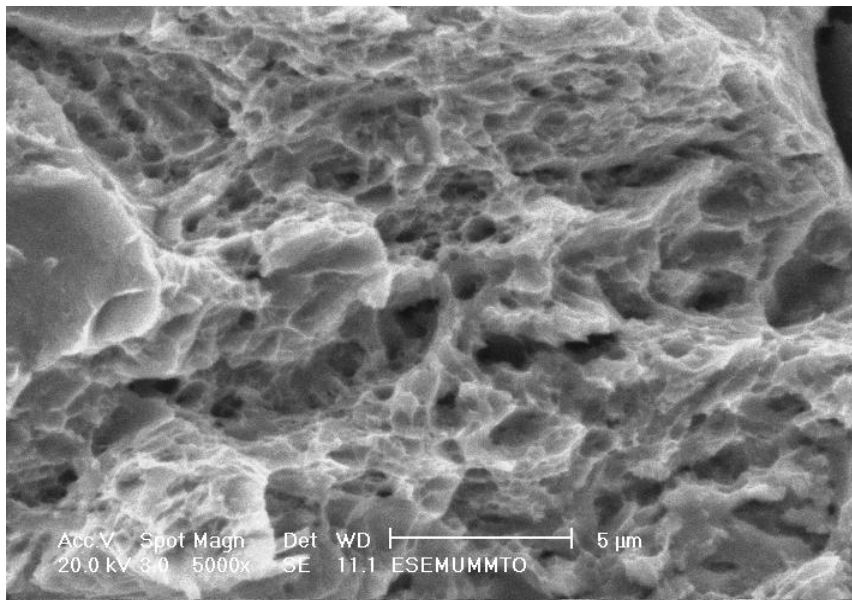


Figure V. 8 : Faciès de rupture de l'éprouvette prélevée dans le sens transverse et dans la partie droite de la lame maîtresse (KCV=17.50 J/Cm²).

➤ **discussion des résultats**

Les figures V. 05 et V.06 représentent le faciès de rupture des deux éprouvettes prélevées dans le sens transverse (perpendiculairement à la direction de laminage D_L) et respectivement pour la partie gauche et pour la partie droite de la lame maîtresse. Les faciès dans les deux cas de figures sont des faciès à cupules caractérisant un mode de rupture ductile. La différence réside sur la taille des cupules. Pour le cas de l'éprouvette issue de la partie gauche (Figure V.7) les cupules sont plus fines que pour le cas de l'éprouvette issue de la partie droite de la lame (Figure V.8). Ceci justifie la valeur plus grande de la résilience (20 J/Cm^2) pour le cas du faciès à cupules fines relatif à une structure initiale à grains fins (figure V.7).

Conclusion Générale

Conclusion

Cette étude nous a permis de déterminer la caractérisation de la résilience de l'acier à ressort de nuance 55Cr3 du point de vue mécanique.

Il existe plusieurs types de ressorts à lames qui sont utilisés selon la nature du véhicule et le domaine où il est destiné à travailler. Dans le cas des autobus et des poids lourds, qui subissent des fortes variations de charge, il faut utiliser des ressorts à lames multiples et à flexibilité variable pour qu'ils puissent avoir une bonne suspension et un bon confort en marche.

Nous concluons que le matériau constituant le ressort à lames multiples de la suspension du camion K66 est un acier de nuance 55Cr3 (acier hypoeutectoïde faiblement allié au chrome).

L'analyse des valeurs obtenues de l'essai de résilience nous laisse conclure que la lame présente une forte anisotropie d'une part et que d'autre part pour une même direction de prélèvement selon des zones différentes, il existe une dispersion des résultats de la résilience qui donne de l'effet sensible du rayon de courbure de la lame qui est imposé lors de sa mise en forme (cintrage à chaud) pour lui donner sa forme parabolique.

Ce qu'il faut retenir en conclusion de l'observation des faciès de rupture c'est le fait que globalement les faciès sont en majorité des faciès à cupules caractérisant un mode de rupture ductile. Les zones lisses minoritaires caractéristiques d'une rupture fragile n'ont pas d'influence sur la résilience de la lame maîtresse gouvernée par le mode de rupture ductile.

Toutes ces constatations nous permettent de conclure aussi que la lame maîtresse du ressort à lame multiple de l'acier 55Cr3 de la suspension du camion K66 qui est fabriquée d'une tôle forte laminée présente une anisotropie mécanique, c'est-à-dire que ses propriétés mécaniques sont différentes selon la direction de sollicitation.

Perspectives

Perspectives

Perspectives :

- Etablir un problème numérique afin de simuler le comportement anisotropie.
- Revisité le procédé de mise en forme des ressorts à lames et les caractériser par un essai de fatigue.
- Trouver des solutions optimales qui minimisent l'anisotropie de ressort à lames de nuance 55Cr3.
- Influence de la température sur la résilience.
- Influence des éléments d'alliages sur les caractéristiques mécaniques de l'acier 55Cr₃ de la suspension pour camion k66.

Références bibliographiques

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **GUY MURRAY**/Aide-mémoire métallurgie /Métaux alliage propriétés /dunod, paris 2004.
- [2] **M.Duchemin** /(1985) Ressorts considération générales, /Technique de l'ingénieur /Vol .B5430
- [3] **M .Duchemin** /(1985) ressorts subissant des contraintes de flexion /Techniques de l'ingénieur /Vol .B5432
- [4] **AMRAR Fatiha et MAKHLOUF Hamida**, Mémoire (D.E.U.A.) U MMTO 2004, caractérisation des ressorts à lames avant et arrière du véhicule k66 pour quatre nuances d'aciers (56Si7 ,56SiCr7,55Cr3 ,51CrV4)
- [5] **HAMROUNI FARROUDJA**, Mémoire d'ingénieure UMMTO 2012, Caracterisation et comportement mécanique des ressorts a lames pour camion K66
- [6] **M.DJOUABI**, Mémoire d'ingénieur UAMB 2001, contribution à l'étude du comportement en traction et en flexion de deux types de tôles pour camion
- [7] document technique de processus de fabrication du ressort à lame pour CVI, COTRELL, Tunisie mars 2001
- [8] **G.LEPRINCE et COL**, la revue de metallurie,page1275-1287 ,octobre1999
- [9] **J.LIGNON R.MAILLBAU** dans, Métaux ferreux technique des fabrications.
- [10] **I.LAKHTINE**, métallographie et traitement thermique des métaux, Edition Mir, Mouscou.

Bibliographie

[11] **Michael F** /choix des matériaux en conception mécanique/l'usine nouvelle /série matériaux/dunod

[12] **C.CHAUSSIN et G.HILLY**, métallurgie tome1 : alliage métallique .Dixième édition Dunod E.N.S.A.M.Ecole d'ingénieurs I.U et B.T.S bordas 1276

[13] **Jean Barralis. Gérard Maeder**, Elaboration, Structures-Propriétés, Normalisation.

[14] **DOMINIQUE FRANCOIS**, essais mécaniques et lois de comportement SDM184 deuxième édition

[15] **S. DELLYS et N.KHOURTA**, Mémoire d'ingénieur UAMB 2005, caractérisation microstructurale et mécanique d'un joint soudé de la liaison bimétallique acier Z120M12/Acier E36.Cas de l'assemblage de la pelle de rétro chargeur à l'Entreprise Nationale des Matériels de Travaux Publics(ENMTP)

[16] sit Web.<http://www.fr.wikipedia.org>.

[17] **B.ZERROUK** ; Mémoire d'ingénieur USTHB 2001(Influence de la décarburation sur des pièces sollicitées par des efforts mécaniques)