

Ressorts

Généralités

par **Michel DUCHEMIN**

*Ingénieur de l'Institut Catholique d'Arts et Métiers de Lille
Ingénieur de l'École Supérieure de Soudure Autogène de Paris
Chef de Produit ferroviaire à la Société Ressorts Industrie*

1. Définitions	B 5 430 - 2
1.1 Déflexion	— 2
1.2 Potentiel élastique	— 2
2. Principes généraux	— 2
3. Théorie statique	— 2
4. Contraintes statiques et dynamiques	— 4
4.1 Contraintes constantes (ou statiques).....	— 4
4.2 Contraintes dynamiques. Fatigue	— 4
4.3 Chocs	— 4
4.4 Durée de vie	— 4
5. Classification des ressorts	— 4
5.1 Ressorts à module d'élasticité élevé et fortes contraintes.....	— 4
5.2 Ressorts à faible module d'élasticité et faibles contraintes.....	— 5
5.3 Classification des ressorts selon les contraintes qu'ils subissent.....	— 5
6. Matières	— 6
6.1 Métaux à travailler à froid.....	— 6
6.2 Métaux à travailler à chaud	— 9
6.3 Matériaux non métalliques	— 9
7. Procédés de fabrication	— 9
7.1 Fabricant des ressorts métalliques	— 9
7.2 Fabrication des ressorts en caoutchouc	— 13
8. Facteurs influençant la durée de vie d'un ressort métallique	— 14
8.1 Le métal et sa mise en œuvre.....	— 14
8.2 Conditions d'utilisation	— 16
8.3 Le caoutchouc	— 17
Pour en savoir plus	Doc. B 5 440

Tout effort appliqué à une pièce mécanique la met dans un état de contrainte qui la déforme.

Cette déformation est utile dans plusieurs cas :

- pour maintenir un effort constant ou un couple constant (cas des attaches) ;
- pour signaler ou contrôler la valeur d'une force ou d'un couple (cas des dynamomètres) ;
- pour emmagasiner de l'énergie motrice (cas des horloges) ;
- pour limiter la force due à un choc (cas des tampons) ;
- pour suspendre une masse et filtrer une vibration (cas des suspensions).

Mais elle est souvent nuisible au bon fonctionnement des organes mécaniques. C'est pourquoi l'on préfère la localiser dans un organe appelé ressort qui peut se déformer fortement.

Notations et Symboles

Symbole	Unité	Désignation
C	N · m	Couple extérieur appliqué au ressort
E	MPa	Module d'élasticité longitudinal ou module d'Young
F	mm/N	Flexibilité = f/P
G	MPa	Module d'élasticité transversal ou module de Coulomb
H	mm	Hauteur du ressort sous charge P
H_0	mm	Hauteur du ressort libre (non chargé)
P	N	Effort extérieur appliqué au ressort
R	N/mm	Raideur = P/f
V	mm ³	Volume de la matière du ressort
W	N · mm	Potentiel élastique ou énergie interne
f	mm	Déflexion ou déplacement du point d'application de la force extérieure
q	N/mm ²	Quantité d'énergie emmagasinée dans l'unité de volume avec des contraintes normales
q_t	N/mm ²	Quantité d'énergie emmagasinée dans l'unité de volume avec des contraintes tangentielles
θ	rd	Rotation de la section à laquelle est appliqué un couple
λ		Coefficient d'utilisation de la matière du ressort
ν		Coefficient de Poisson
σ	MPa	Contrainte normale
σ_a	MPa	Contrainte normale limite admissible
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	MPa	Contraintes principales en un point du ressort
τ	MPa	Contrainte tangentielle
τ_a	MPa	Contrainte tangentielle limite admissible

1. Définitions

1.1 Déflexion

Nous appellerons *déflexion* la déformation totale correspondant au déplacement du point d'application d'une force quand elle est appliquée au ressort initialement libre.

Le mot *flèche* sera réservé à la flèche géométrique d'une lame dans un ressort à lame.

La course est le déplacement du point d'application de l'effort entre deux valeurs d'une force.

1.2 Potentiel élastique

La déformation d'une pièce mécanique est dite *élastique* si elle revient à sa forme initiale quand l'effort est annulé. La déformation est *plastique* quand elle est définitive.

Une pièce métallique soumise à des contraintes qui dépassent par endroit sa limite élastique ne revient pas à sa forme initiale. Elle subit alors à la fois une déformation élastique et une déformation plastique.

Un ressort est fabriqué pour supporter des efforts jusqu'à une certaine limite dite *charge maximale*.

Jusqu'à cette limite, toutes les déformations sont élastiques. Au-delà de cette limite on risque des déformations plastiques appelées *fluage*.

Charger le ressort nécessite un certain travail qui est emmagasiné par le ressort et qui est restitué quand le ressort est libéré. Ce travail disponible est appelé potentiel élastique, potentiel interne, ou énergie interne du ressort.

2. Principes généraux

Les ressorts peuvent être considérés comme des poutres ou des ensembles de poutres soumises aux lois générales de la Résistance des matériaux sous réserve de leurs conditions restrictives constituant les hypothèses fondamentales de la Résistance des matériaux (article spécialisé *Théorie des poutres* [C 2 010] dans le traité Construction) et qui peuvent s'exprimer comme suit :

- les actions extérieures s'exerçant sur la poutre sont soit une force P supposée appliquée au centre d'une section droite, soit un couple C appliqué à une section droite ;
- les diverses conditions de forme et de charge entraînent une déflexion (ou déplacement du point d'application de la force P) dirigée suivant la ligne d'action de P , ou une rotation de la section d'application de couple C autour d'un axe parallèle à celui de C ;
- il n'existe aucune résistance passive ;
- la force P (ou le couple C) agit lentement et progressivement de manière à amener la pièce de son état initial à son état final d'équilibre sans qu'elle prenne à aucun moment d'énergie cinétique ; on admet que la déflexion est assez petite pour pouvoir être considérée comme proportionnelle à l'effort ; c'est le type même de la déformation statique.

En pratique, ces conditions ne peuvent être exactement remplies et la théorie des ressorts, dérivée des lois de la Résistance des matériaux ne peut constituer qu'une approximation.

Dans le cas où les conditions restrictives ne sont pas remplies, on a intérêt à reprendre l'étude en fonction des conditions réelles d'utilisation et à définir de nouvelles formules valables dans le cas considéré.

Les conditions de fabrication et de prix de revient peuvent imposer des sujétions dont l'influence doit être vérifiée par l'expérimentation.

3. Théorie statique

Partons du cas d'une poutre de section constante soumise à la traction ou à la compression pure.

Le rapport $dP/df = R$ s'appelle raideur du ressort et son inverse est la flexibilité du ressort.

La connaissance de R permet de déterminer la caractéristique de charge $P = g(f)$ dont la représentation est ici une droite (figure 1) car $P/f = Cte$.

Le travail fourni pour amener le ressort en équilibre à la déflexion f devient potentiel interne du ressort, il est égal à $W = \int P df$; puisque $P/f = Cte$:

$$W = \frac{1}{2} Pf$$

De même, quand un couple C provoque une déformation θ qui lui est proportionnelle :

$$W = \frac{1}{2} C\theta$$

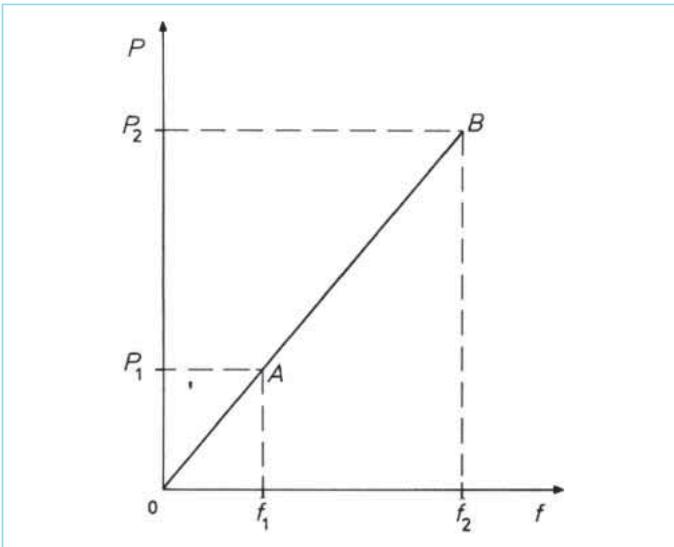


Figure 1 – Caractéristiques de charge d'une poutre de section constante soumise à la traction ou à la compression pure

D'après la théorie du potentiel interne exposée dans l'article *Calcul des structures* [A 300] du traité Sciences fondamentales et en supposant la transformation réversible et la température constante :

$$W = \frac{1}{E} \int_V \left[\frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2 - (v+1) (\sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x + \sigma_x \sigma_y) \right] dV$$

avec σ_x , σ_y et σ_z contraintes au point considéré.

Dans la poutre considérée de section constante et soumise uniquement à la traction ou à la compression pure $\sigma_y = \sigma_z = 0$, $\sigma_x = \sigma$ est la même dans toutes les sections et le potentiel interne devient :

$$W = \frac{1}{E} \int \frac{1}{2} \sigma^2 dV = \frac{\sigma^2 V}{2E}$$

Dans le cas général d'un ressort quelconque soumis à des charges variables, et dans lequel les contraintes restent proportionnelles entre elles quand la charge varie, on peut écrire que :

$$W = \lambda \frac{\sigma^2 V}{2E}$$

avec σ contrainte de la section la plus sollicitée,

λ coefficient d'utilisation du ressort.

Le coefficient d'utilisation λ est le rapport de l'énergie emmagasinée dans ce ressort de volume V , soumis à une contrainte maximale admissible σ_a , à l'énergie emmagasinée dans un ressort de traction de même volume entièrement soumis à la même contrainte maximale σ_a .

La quantité d'énergie que l'on peut introduire dans l'unité de volume du ressort est égale à :

$$q = \frac{W}{V} = \frac{\lambda}{2E} \sigma_a^2$$

pour les ressorts soumis à des contraintes normales ;
et à :

$$q_\tau = \frac{W}{V} = \frac{\lambda}{2G} \tau_a^2$$

pour les ressorts soumis à des contraintes tangentielles.

Ces deux expressions montrent clairement l'importance des différents paramètres qui interviennent dans la détermination du volume d'un ressort et de l'énergie que peut emmagasiner un ressort de volume donné.

λ coefficient d'utilisation de la matière est toujours inférieur à l'unité, mais on cherche à l'en rapprocher au maximum avec des ressorts sous forme de solide d'égale résistance qui font travailler la majeure partie de la matière à la contrainte maximale admissible. Mais λ est indépendant de la nature de la matière utilisée pour la fabrication du ressort.

σ_a et τ_a sont respectivement les contraintes normales et tangentielles maximales ; comme elles interviennent au carré, leur importance est primordiale. Au cours de sa fabrication un ressort est traité de façon à pouvoir donner à σ_a et τ_a les valeurs maximales.

E et G sont respectivement les modules d'élasticité correspondant aux contraintes normales et tangentielles.

Pour fabriquer les ressorts on choisit les matières qui permettent d'atteindre les valeurs σ_a^2/E ou τ_a^2/G les plus élevées.

■ Choix du type de sollicitation

Les métaux et autres matières qui admettent de fortes contraintes ont des modules d'élasticité très élevés.

L'acier par exemple qui peut supporter une contrainte de traction d'environ 1 000 MPa a un module d'élasticité E voisin de 200 000 MPa.

L'allongement maximal dans ces conditions n'est que de $1\,000/200\,000 = 1/200$.

Un ressort de traction de 100 cm ne s'allonge que de 0,5 cm. Les résultats étant du même ordre pour les ressorts sollicités en compression et en cisaillement, on aura recours, de préférence, aux sollicitations de flexion et de torsion pour les ressorts métalliques.

Il est intéressant de comparer les deux modes de sollicitations, sachant que l'acier soumis à une charge constante peut supporter des contraintes de flexion sensiblement doubles des contraintes de torsion $\sigma_a = 2 \tau_a$ et qu'entre les modules d'élasticité transversal G et longitudinal E existe le rapport $G/E = 0,4$.

Le rapport des quantités d'énergie emmagasinées par unité de volume entre un ressort de flexion et un ressort de torsion est alors, en admettant le même coefficient d'utilisation :

$$\frac{q}{q_\tau} = \frac{\frac{\lambda}{2E} \sigma_a^2}{\frac{\lambda}{2G} \tau_a^2} = \frac{G}{E} \left(\frac{\sigma_a}{\tau_a} \right)^2 = 0,4 \times (2)^2 = 1,6$$

En **contraintes statiques** et à coefficient d'utilisation égal, le ressort de flexion emmagasine 1,6 fois plus d'énergie que le ressort de torsion de même volume.

Cette règle ne s'applique pas aux ressorts soumis à des charges dynamiques car alors les contraintes maximales admissibles ne dépendent pas seulement de la matière mais également d'autres facteurs qui favorisent les ressorts travaillant en torsion.

Certaines matières, comme le caoutchouc, ne peuvent pas admettre de fortes contraintes mais sont cependant utilisées comme ressort à cause de leur faible module d'élasticité (2 à 20 MPa) et de leur faible masse volumique ($\approx 10^3 \text{ kg/m}^3$).

Contrairement aux ressorts métalliques les ressorts en caoutchouc sont, de préférence, sollicités en compression, en traction et en cisaillement.

En tenant compte de ces considérations on classera les ressorts en fonction d'abord du module d'élasticité de la matière, ensuite du genre de sollicitation qu'ils subissent (§ 5).

4. Contraintes statiques et dynamiques

4.1 Contraintes constantes (ou statiques).

On peut se servir d'un ressort pour appliquer une force constante P en le maintenant à une certaine hauteur H différente de sa hauteur initiale H_0 . Dans ce cas la déflexion du ressort est la différence des hauteurs $H_0 - H$. Les contraintes appliquées resteront constantes à condition qu'elles ne dépassent en aucun point la limite élastique de la matière ; le ressort déchargé reprendra sa forme initiale. Si on lui impose à nouveau la hauteur H , il appliquera la même charge P .

Cependant, si le ressort reste très longtemps à la hauteur H à une contrainte proche de la limite élastique, la charge P diminuera progressivement ; cette perte de charge est appelée *relaxation*. Si la charge P est constante, c'est la hauteur H du ressort qui diminuera, cette perte de hauteur est appelée *fluage*.

Les ressorts comportant de faibles rayons de courbure, des entailles ou des trous sont soumis à des concentrations de contraintes qui ne sont pas toujours parfaitement appréciables par le calcul et qui risquent d'amener un dépassement local de la limite élastique et une perte de charge.

Une opération incluse dans la fabrication du ressort et appelée *préconformation* permet, à condition que le métal soit suffisamment ductile, de réduire ces inconvénients en incorporant au ressort un réseau de tensions internes opposées aux contraintes de service. Cette opération est particulièrement importante quand on ne tolère pas de variation de charge ou de hauteur des ressorts. Elle sera décrite au paragraphe 7.1.4.4.

Quand les ressorts sont soumis à des températures élevées, la limite élastique à considérer est celle de la matière à la température de travail. Cette limite élastique est, en général, beaucoup plus faible que celle à la température ambiante ; les risques de déformation permanente et de perte de charge sont beaucoup plus grands. Au-delà de 180 °C, la charge des ressorts ordinaires en acier décroît progressivement en fonction du temps et d'autant plus rapidement que la contrainte et la température sont plus élevées. On a alors recours à une préconformation à température supérieure à la température d'utilisation et à l'emploi d'alliages (§ 6.1).

La plupart des attaches des installations fixes (bâtiment, échafaudages, tuyauteries) supportent ou appliquent une charge constante. Elles peuvent être conçues pour travailler à des contraintes proches de la limite élastique à condition qu'elle n'aient pas à supporter de vibrations qui entraîneraient des variations de contrainte, même de faible amplitude et qui, répétées un grand nombre de fois, pourraient entraîner leur rupture.

4.2 Contraintes dynamiques. Fatigue

Beaucoup de ressorts portent des charges qui varient continuellement. Quand cette variation se reproduit périodiquement, le cycle de contrainte est alterné, répété ou ondulé (article *Essais de fatigue* [M 4 170] dans le traité Matériaux métalliques).

Si la variation n'est pas périodique, on l'assimile à une suite de cycles inégaux et l'on dit que le ressort est soumis à des contraintes variables.

La détermination des ressorts soumis à des contraintes dynamiques est fondée sur leur résistance à la fatigue (article *Fatigue des alliages ferreux. Approche classique* [B 5 050] dans ce traité).

4.3 Chocs

On utilise des ressorts pour limiter la valeur des efforts dus à des chocs. Tel est le cas des ressorts de tampon et de butée. Dans la détermination d'un ressort soumis à des chocs répétés, il faut non seulement tenir compte de la relaxation et de la résistance à la fatigue du métal mais aussi de sa résilience. La fatigue peut être assimilée à celle qui serait produite par une contrainte répétée.

4.4 Durée de vie

On appelle durée de vie d'un ressort soumis à une charge constante, le temps qui amène le ressort à une certaine perte de hauteur. Pour un ressort maintenu à une hauteur constante, c'est le temps qui amène une certaine perte de charge. Pour un ressort soumis à la fatigue selon un cycle périodique, c'est le nombre d'alternances ou de cycles de contraintes qui amène soit la rupture du ressort, soit une déformation permanente égale à une valeur donnée. Ce nombre d'alternances est fonction de l'amplitude des contraintes auxquelles le ressort est soumis. La détermination du ressort se fait en choisissant une durée de vie en cherchant dans le diagramme de Goodman des ressorts fabriqués selon le même procédé la contrainte moyenne et l'amplitude de contrainte qui permettent de respecter la durée de vie choisie (article *Fatigue des alliages ferreux. Approche classique* [B 5 050] dans ce traité).

Pour un ressort soumis à des contraintes variables, un ressort de suspension de véhicule par exemple, on divise la vie du ressort en séquences égales qui comportent chacune un certain nombre de cycles pour chaque niveau de contrainte. La durée de vie du ressort est alors le nombre de séquences qui amène la rupture du ressort.

5. Classification des ressorts

On considère deux grandes catégories de ressorts selon le module d'élasticité de la matière qui les constitue :

- les ressorts métalliques qui ont un module d'élasticité élevé ;
- les ressorts en caoutchouc qui ont un faible module d'élasticité.

Il existe aussi des ressorts composites dont les applications sont encore très limitées à cause de leur prix élevé.

Dans chaque catégorie les ressorts sont classés selon le type de sollicitations pour lequel ils ont été conçus : on distinguera les ressorts subissant des contraintes normales : traction, compression, flexion, et ceux qui subissent des contraintes tangentielles : cisaillement, torsion.

5.1 Ressorts à module d'élasticité élevé et fortes contraintes

5.1.1 Ressorts subissant des contraintes normales

■ Dans le cas de **contraintes de traction** dans une partie du volume et **contraintes de compression** dans une autre partie, nous avons :

- les ressorts annulaires ;
- les rondelles Belleville.

■ Dans le cas de **contraintes de flexion**, nous trouvons de nombreuses variantes de lames et de ressorts composés d'un empilage de lames :

— lames encastrées à une extrémité et chargées à l'autre (ou bras flexible) :

- bras de forme triangulaire ou trapézoïdale,
- bras à profil parabolique ;
- ressorts à lames simples ;
- ressorts à lames multiples composés d'un empilage de lames équivalant à une lame triangulaire ou trapézoïdale ;
- ressorts composés d'un empilage de lames égales ; ces ressorts sont couramment utilisés pour la suspension des véhicules routiers et ferroviaires et peuvent porter des charges allant jusqu'à 40 t dans certains cas ;
- ressorts de torsion formés d'une lame ou d'une barre enroulée en spirale ou en hélice et soumis à un moment de flexion coaxial à la spirale ou à l'hélice.

5.1.2 Ressorts subissant des contraintes tangentielles

En pratique, ce sont toujours des contraintes de torsion. Ces ressorts sont les suivants :

- barres de torsion ;
- ressorts hélicoïdaux soumis à une force coaxiale comprenant de nombreux ressorts de mécanisme de traction ou de compression conçus pour porter des forces allant de quelques grammes jusqu'à plus de 10 t pour les gros ressorts de compression ;
- autres ressorts enroulés soumis à une force coaxiale.

5.1.3 Ressorts subissant à la fois des contraintes normales et des contraintes tangentielles

Ce sont des stabilisateurs.

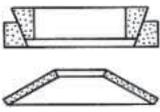
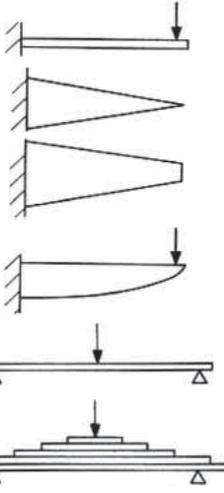
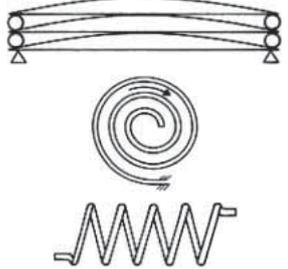
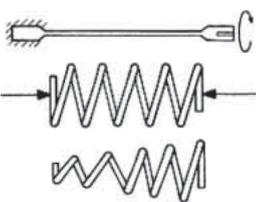
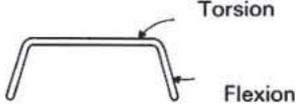
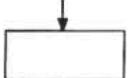
5.2 Ressorts à faible module d'élasticité et faibles contraintes

Ce sont des ressorts en caoutchouc ; ils sont conçus pour supporter des contraintes de compression, d'extension ou de cisaillement.

5.3 Classification des ressorts selon les contraintes qu'ils subissent

Elle est donnée dans le tableau 1.

Tableau 1 – Classification des ressorts selon les contraintes qu'ils subissent

Module d'élasticité élevé	
	<ul style="list-style-type: none"> • Contraintes normales Traction et compression Ressorts annulaires Rondelles Belleville
	Flexion Bras flexible : – bras triangulaire – bras trapézoïdal – bras à profil parabolique Ressorts à lame simple Ressorts à lames multiples
	Ressorts à lames égales Ressorts spirales Ressorts de torsion, en hélice
	<ul style="list-style-type: none"> • Contraintes tangentielles (torsion) Barres de torsion Ressorts hélicoïdaux de traction et de compression Autres ressorts enroulés
	<ul style="list-style-type: none"> • Contraintes normales et tangentielles Stabilisateurs
Faible module d'élasticité	
	Ressorts en caoutchouc

6. Matières

Les matières les plus intéressantes pour la fabrication des ressorts sont celles qui peuvent emmagasiner le maximum d'énergie dans l'unité de volume (ou de masse).

En fonction de ce qui a été déterminé au paragraphe 3, ce sont celles qui offrent le meilleur compromis entre des contraintes maximales admissibles les plus élevées possibles et le module d'élasticité le plus faible. Des considérations de prix, de fiabilité et d'encombrement, qui interviennent aussi, font généralement choisir les métaux durs et plus particulièrement les aciers (malgré leur module d'élasticité élevé) à cause des fortes contraintes qu'ils admettent quand ils ont subi les traitements thermiques et mécaniques qui augmentent fortement leur limite élastique et leurs résistances à la fatigue et au fluage, sans altérer leur module d'élasticité.

Les caoutchoucs naturels et synthétiques, qui ne présentent pas ces avantages, peuvent cependant être choisis quand une grande précision n'est pas nécessaire, à cause de leur faible module d'élasticité et de leur hystérésis.

6.1 Métaux à travailler à froid

Nota : on se reportera à la rubrique *Mise en forme des métaux* dans le traité Matériaux métalliques.

Le tréfilage et le laminage à froid fournissent des fils et des bandes écrouis avec lesquels on produit économiquement des ressorts. Le procédé est particulièrement intéressant pour les ressorts formés à froid avec des fils de diamètre inférieur à 8 mm, le taux d'écrouissage augmentant fortement la dureté et la limite élastique.

Les propriétés du métal tréfilé sont intimement liées à la déformation plastique qu'il a subie dans la filière ; le grand écrouissage du métal en surface y établit des contraintes résiduelles d'extension, voisines de la limite élastique, qui sont compensées à cœur par des contraintes résiduelles de compression [1].

À l'essai de traction, les couches superficielles atteignent très vite la limite élastique et sont plastifiées. La limite élastique disparaît sur la courbe de traction ; de plus, la charge de rupture s'applique à une zone de striction très marquée et n'a guère de signification.

Le fabricant de ressort est donc peu intéressé par cet essai et lui préfère souvent un essai de torsion consistant à compter le nombre de tours pour obtenir la rupture. Le diagramme de torsion indiquant la valeur du couple en fonction du nombre de tours se présente comme une courbe régulièrement croissante (figure 2). Pour l'acier dur, un taux de réduction de section au tréfilage compris entre 60 % et 85 %, couramment utilisé, donne le plus grand nombre de tours. La rupture n'entraîne pas de réduction de section, mais se produit brusquement dans un plan perpendiculaire à l'axe du fil. Cependant, il peut se produire une décohésion hélicoïdale surtout quand la charge de rupture est élevée, quand le rapport limite élastique sur charge de rupture est grand ou que le nombre de passes de tréfilage est insuffisant. La décohésion se signale par une réduction brusque et prématurée du couple, un tracé irrégulier de la courbe de torsion et souvent une réduction de la longueur de l'éprouvette.

L'essai de pliages répétés peut aussi être appliqué en comptant le nombre de pliages jusqu'à rupture. Il est maximal pour un taux de réduction de section au tréfilage de 80 % et diminue fortement au-delà.

Après tréfilage les contraintes résiduelles dans le fil ont l'allure de la figure 3, avec de très fortes contraintes résiduelles de traction en surface et des contraintes de compression à cœur.

À la longue il se produit une relaxation des contraintes résiduelles qui tend à les égaliser. Elle peut être accélérée par un chauffage à une température de 150 à 300 °C. Pour l'acier, elle s'accompagne d'une augmentation de la résistance à la rupture d'autant plus grande

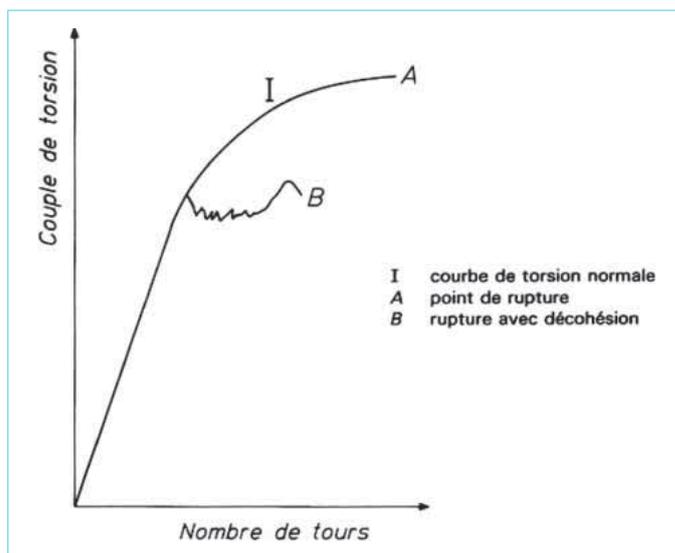


Figure 2 - Diagramme de torsion de fil tréfilé

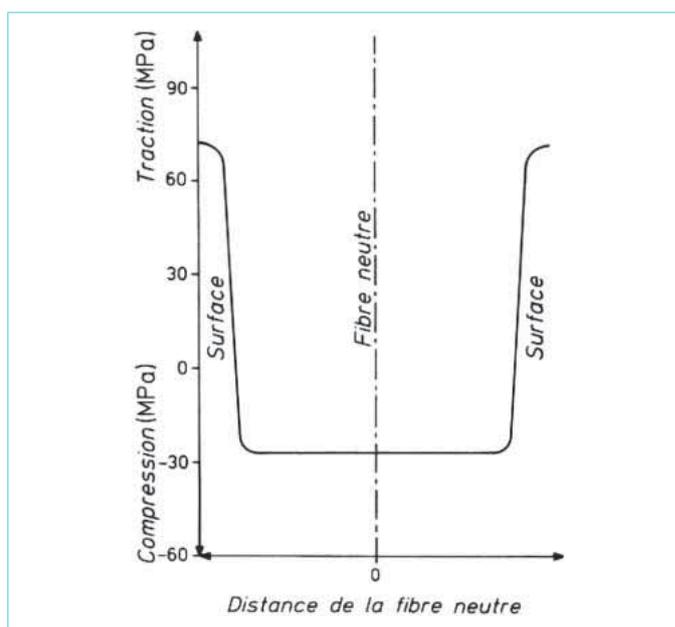


Figure 3 - Contraintes résiduelles dans le fil tréfilé

que la teneur en carbone est plus élevée et d'une augmentation de la limite élastique liée au taux d'écrouissage initial, avec un maximum correspondant à une température de chauffage de 230 °C. L'échauffement dû au tréfilage suffit parfois à assurer cette amélioration. C'est un vieillissement qui influe très sensiblement sur les résultats d'essais.

Pour un taux d'écrouissage trop important, l'essai de torsion peut devenir irrégulier et faire apparaître une décohésion du métal avec un couple nettement réduit.

Les duretés d'un acier au carbone tréfilé et vieilli sont données dans le diagramme de la figure 4, en fonction du diamètre du fil et de la teneur en carbone de l'acier.

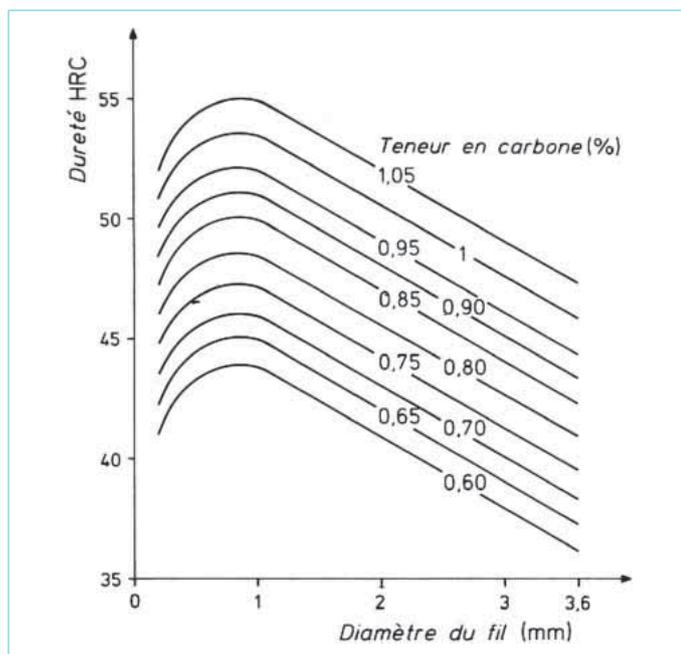


Figure 4 - Dureté de l'acier au carbone écroui

L'acier est fourni en couronne avec des diamètres de fil allant jusqu'à 14 mm. Les nuances les plus utilisées sont les nuances AFNOR XC 55, XC 65, XC 70 et XC 80.

L'acier au carbone ou faiblement allié destiné au travail à froid est généralement *patenté* avant tréfilage, c'est-à-dire que le fil machine, laminé à chaud, est adouci par passage dans un premier bain de plomb à haute température, où il est austénitisé, et dans un second bain à plus basse température où il prend une structure sorbitique. Le fil patenté est tréfilé à froid à la dimension désirée, le taux de réduction ayant été déterminé pour obtenir une grande dureté. Ce fil peut cependant être ensuite trempé à l'huile et revenu (article *Traitements thermiques dans la masse des aciers de construction* [M 1 125] dans le traité Matériaux métalliques).

Quand il est destiné à des ressorts sévèrement sollicités en fatigue, l'acier doit avoir été laminé lentement à chaud, patenté, tréfilé avec un taux de réduction au plus égal à 70 % et traité thermiquement en continu. Les plus grandes précautions auront été prises pour éviter toutes rayure, égratignure et décarburation et pour que les carbures se soient bien uniformément dissous.

La corde à piano est une très bonne qualité de fil dur tréfilé à froid, patenté puis tréfilé à sec, patenté à nouveau et tréfilé dans une solution de sels d'étain qui lubrifie la filière. Le taux de réduction en huit à dix passes est d'environ 80 %. Le fil est alors souvent vieilli par chauffage à 380 °C environ pour augmenter sa stabilité. La surface est très lisse, sa dureté, sa limite élastique, sa résistance à la fatigue et au fluage sont excellentes surtout dans les petits diamètres où elles sont supérieures à celles des fils prétraités.

La corde à piano s'applique à tous les ressorts en fil de diamètre inférieur à 0,7 mm et à tous ceux qui travaillent en fatigue jusqu'à 3 mm.

Elle peut être appliquée concurremment au fil prétraité jusqu'à un diamètre de 7 mm.

Les fils prétraités et les aciers alliés sont meilleurs pour des dimensions supérieures.

On trouvera sur le diagramme de la figure 5, en fonction du diamètre du fil, une comparaison des contraintes maximales admissibles dans les différents fils quand ils ne sont soumis qu'à des contraintes constantes.

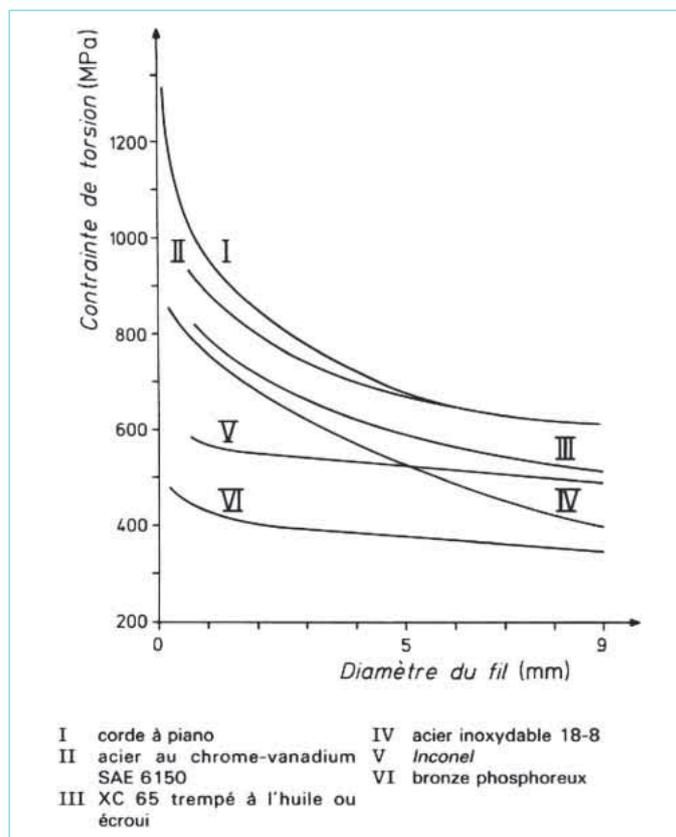


Figure 5 - Contraintes statiques maximales admissibles selon le diamètre du fil

Le diagramme de Goodman tracé sur la figure 6 donne, selon Harold et Carlson, les contraintes maximales admissibles quand ils sont soumis à la fatigue [2].

Les aciers au carbone et les aciers manganosiliceux peuvent aussi être utilisés sous la forme de feuillard laminé à froid.

Les **aciers alliés** les plus utilisés sont :

- les aciers au chrome-vanadium pour les ressorts travaillant à une température supérieure à 220 °C ;
- les aciers au chrome-silicium qui peuvent être trempés à l'huile à une dureté de 50 à 54 HRC dans les diamètres compris entre 1 et 10 mm ; ils ont une bonne résistance au fluage et à la fatigue et peuvent résister à une température de 200 °C si les sollicitations ne sont pas exagérées ;
- les aciers au silicium-manganèse qui, pour les petits diamètres de fil, ont des propriétés équivalentes aux aciers au chrome-silicium ;
- les aciers au tungstène et au molybdène qui peuvent être utilisés jusqu'à des contraintes de 2 700 MPa et jusqu'à la température de 370 °C et même jusqu'à 420 °C, dans certains cas, à condition d'avoir été préparés par double tréfilage à une température de 600 °C avec refroidissement intermédiaire ;
- les aciers inoxydables chrome-nickel.

Les **alliages non ferreux** les plus utilisés sont :

- les laitons et les bronzes phosphoreux laminés à froid ou étirés, utilisés à de faibles contraintes pour leur conductivité électrique et leur résistance à la corrosion ;
- les bronzes au silicium surtout utilisés pour réduire le coût par rapport aux précédents ;
- Le *Monel* laminé à froid ou étiré utilisé aux températures inférieures à 200 °C et contraintes moyennes pour résister à la corrosion ;

— l'*Inconel* utilisé à de plus fortes contraintes (jusqu'à 350 °C) ;
— les alliages à base de cobalt qui peuvent être utilisés jusqu'à des températures dépassant 700 °C [2].

Chaque fois qu'un ressort doit travailler au-dessus de 100 °C, le choix du métal à utiliser est fait en fonction de la température en admettant un certain fluage. La figure 7 a été tracée en admettant un fluage de 1 % par jour. Elle donne la contrainte statique maximale admissible pour une température donnée.

Les aciers inoxydables, et notamment les chrome-nickel tréfilés à froid à des diamètres de 0,1 à 8 mm, ont une très bonne résistance à la corrosion et peuvent être utilisés à des températures allant jusqu'à 260 °C. Une addition de 2 à 3 % de molybdène augmente leur résistance à la corrosion marine (article *Aciers inoxydables. Critères de choix et structure* [M 4 540] dans le traité Matériaux métalliques).

Une nuance austénitique instable comme l'acier Z 10 NC 17-7 qui s'écroutit fortement atteint une résistance à la traction de 1 800 MPa avec une limite élastique de 1 600 MPa environ. La ductilité est encore suffisante pour permettre la fabrication de ressorts fortement sollicités [3]. D'autres nuances qui s'écroutissent moins et des nuances ferritiques peuvent aussi être utilisées, selon les cas, mais leur limite élastique plus faible ne permet pas les mêmes sollicitations.

Une étude détaillée des propriétés statiques et dynamiques des aciers inoxydables a été faite par P. Funke et K. H. Kayser [4].

Le tableau 2 regroupe les principaux métaux utilisés en fabrication à froid avec leurs modules d'élasticité et leurs températures maximales d'utilisation recommandées et le tableau 3 donne la composition chimique des nuances d'acier couramment utilisées.

Tableau 2 – Métaux utilisés pour la fabrication à froid des ressorts

Métal	E (MPa)	G (MPa)	Températures maximales d'utilisation (°C)
Acier au carbone étiré dur.....	202 000	80 600	200
Acier au carbone trempé à l'huile	201 000	79 200	200
Corde à piano	212 000	85 000	120
Acier au chrome-vanadium.....	212 000	80 000	220
Acier manganosiliceux.....	205 000	77 000	200
Acier au chrome-silicium	212 000	80 000	230
Acier inoxydable 18-8.....	188 000	70 000	280
Acier inoxydable 17-7.....	208 000	78 000	230
Laiton	106 000	35 400	80
Bronze 70/30	105 000	35 000	80
Bronze phosphoreux	105 000	43 000	105
Bronze au silicium.....	105 000	43 000	105
Bronze au glucinium.....	112 000	42 000	110
	à	à	
<i>Inconel</i>	130 000	51 000	
<i>Inconel X</i> (avec traitement spécial)	202 000	73 000	340
<i>Monel</i>	202 000	76 000	425
<i>Duranickel</i>	183 000	67 000	200
	207 000	76 000	350

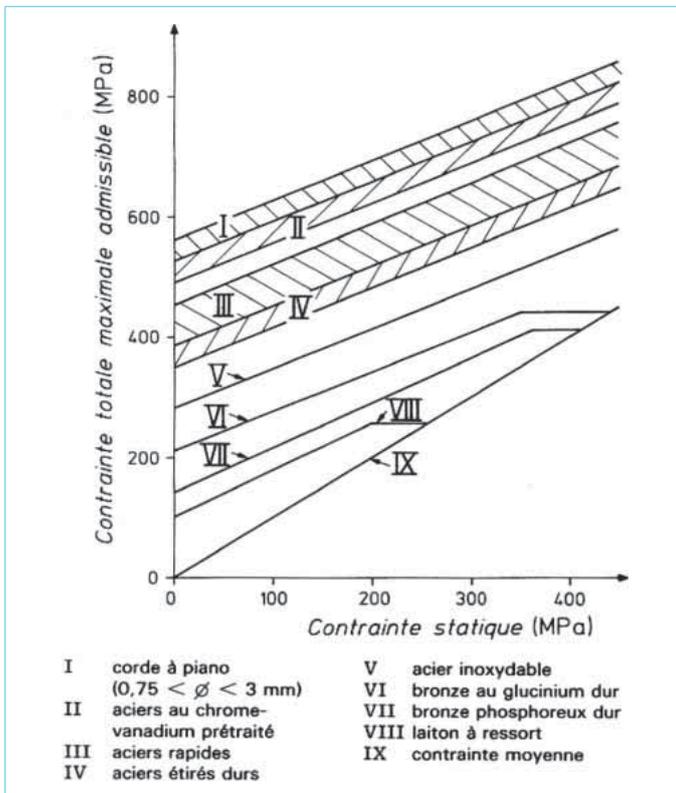


Figure 6 – Diagramme de Goodman des aciers à travailler à froid

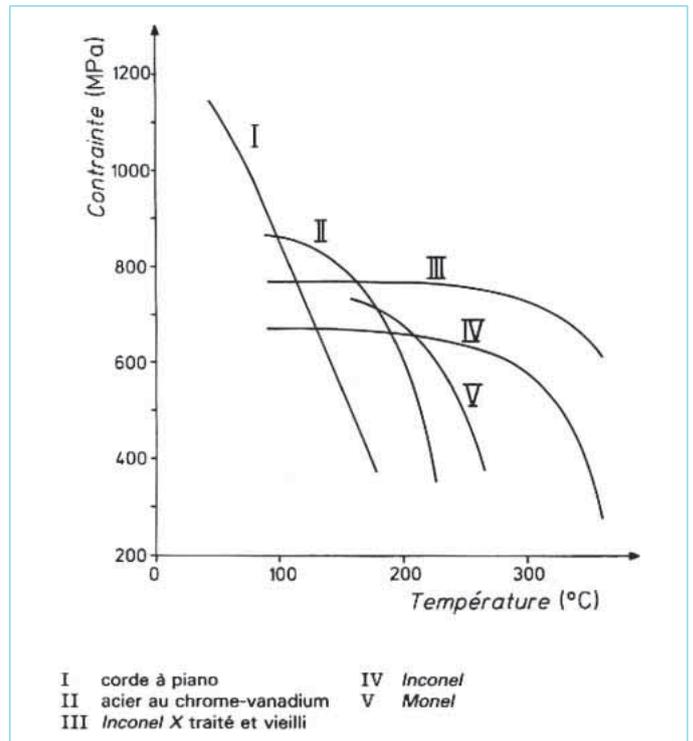


Figure 7 – Contraintes statiques maximales admissibles selon la température

Tableau 3 – Composition des nuances d'acier couramment utilisées.

Acier	C (%)	Si (%)	Mn (%)	Cr (%)	V (%)	Ni (%)	W (%)
au carbone (XC 65).....	0,60 0,69	0,10 0,40	0,50 0,80				
au chrome vanadium (50 CV 4).....	0,45 0,55	0,20 0,40	0,60 1,00	0,80 1,20	0,10 0,20		
manganosiliceux.....	0,53 0,59	1,60 2,00	0,60 0,90				
au chrome-silicium.....	0,50 0,60	1,20 1,60	0,50 0,80	0,50 0,80			
inoxydable 18-8.....			0,40 0,45	18,2 18,8		8,8 8,9	
rapide.....	0,70	0,35	0,25	3,75	1,20	0,07	16

6.2 Métaux à travailler à chaud

Le travail à chaud s'applique à toutes les lames d'épaisseur supérieure à 3 mm et à tous les fils de diamètre supérieur à 15 mm. Il est également appliqué à la grande majorité des fils de diamètre compris entre 10 et 15 mm et tend à s'étendre jusqu'aux fils de 8 mm. Le choix des métaux utilisés est limité par la nécessité de pouvoir leur donner, par traitement thermique, une dureté et une limite élastique suffisante.

Dans la grande majorité des cas, la fabrication se fait avec les aciers de construction alliés de la norme AFNOR NF A 35-571 comprenant notamment des aciers spéciaux qui s'appliquent à la majorité des cas de ressorts travaillant à la fatigue : les aciers au silicium 46 S 7, 51 S 7, 56 SC 7 et 61 SC 7, les aciers au silicium-chrome-molybdène 45 SCD 6 et 50 SCD 6, les aciers au chrome 45 C 4 et 55 C 3, les aciers au chrome-vanadium 50 CV 4 et 51 CDV 4.

Les aciers au silicium sont intéressants pour les diamètres de fil allant jusqu'à 25 mm et les épaisseurs de lames allant jusqu'à 16 mm à cause de leur limite élastique élevée et de leur bonne résistance à la fatigue et au fluage. Pour les dimensions plus élevées, on choisit l'acier 45 SCD 6 jusqu'aux diamètres de fil de 40 mm environ et l'acier 50 SCD 6 pour les diamètres supérieurs.

La calamine des aciers au silicium adhère au métal aux températures de formage et de trempe et risque de former des incrustations nuisibles à la qualité de la surface. La calamine des aciers au chrome et au chrome-vanadium qui est plus friable et se détache facilement ne présente pas cet inconvénient. C'est pourquoi on préfère souvent ces aciers, notamment pour les ressorts à lames, mais leur trempabilité et leur limite élastique sont plus basses, leur fluage plus élevé. Pour les diamètres dépassant 20 mm et les épaisseurs dépassant 10 mm environ, il faut utiliser de préférence les aciers contenant du vanadium (50 CV 4) ou/et du molybdène (50 SCD 6, 51 CDV 4) [5].

À ces différences près les propriétés de tous ces aciers sont à peu près équivalentes [6] et peuvent être ajustées au traitement thermique par le fabricant du ressort en fonction de son utilisation, sachant qu'une augmentation de la dureté et de la limite élastique ne modifie pas sensiblement le module d'élasticité mais diminue la résilience.

Le choix de la nuance d'acier se fait surtout en fonction des dimensions de la section. Les sections les plus grosses imposent les nuances les plus chargées en élément noble et de grandes précautions pour éviter les tapures en cours de fabrication.

Pour les ressorts soumis à la fatigue, l'état de surface ayant une grande importance, la majorité des aciers ronds est finement rectifiée ou de préférence écroulée, le poli obtenu par ce procédé étant meilleur. La forme de la section, les procédés de fabrication et les

précautions que l'on prend pour éviter les incrustations de calamine, et les propriétés que l'on attend des ressorts font généralement préférer, pour les ronds, les aciers au silicium.

Par contre, pour les aciers plats destinés à de fortes sollicitations en fatigue, en usinant la surface, on formerait des arêtes qui sont particulièrement néfastes. On se contente, donc d'aciers bruts de laminage choisis de préférence parmi les aciers au chrome qui, grâce à la nature de leur calamine, ont un meilleur état de surface. Il faut alors admettre, avec une moindre dureté, une moindre limite élastique et des propriétés inférieures à celles des aciers ronds.

Pour les ressorts soumis à contraintes constantes, sans sollicitations de fatigue, l'état de surface n'est plus primordial ; les aciers au silicium qui ont une meilleure résistance au fluage sont préférables. Les aciers RE 375 et RH 388 de la norme NF A 35-571 sont très satisfaisants.

6.3 Matériaux non métalliques

6.3.1 Caoutchouc

Nota : on se reportera à la rubrique *Élastomères* dans le traité *Plastiques et Composites*.

Les ressorts en caoutchouc [7] sont fabriqués à partir de mélanges composés essentiellement d'un élastomère, de charges renforçantes et d'agents de vulcanisation et de protection.

Les principaux élastomères utilisés pour la fabrication des ressorts en caoutchouc sont :

- la gomme naturelle ;
- le polychloroprène (*Néoprène*) ;
- le polyisoprène ;
- les copolymères butadiène/styrène et butadiène/acrylonitrile ;
- le *Butyl*.

Ils peuvent être remplacés par certains polymères réticulés.

Les charges renforçantes sont généralement des noirs de carbone choisis pour augmenter la charge de rupture ou l'allongement et parfois des charges blanches.

Le principal agent vulcanisant est le soufre auquel on ajoute fréquemment un accélérateur de vulcanisation.

Les agents de protection sont des antioxygènes, des antiozones, des anticraquelants et antichaleurs chargés de réduire l'endommagement superficiel du caoutchouc par l'action de l'atmosphère environnante et le rayonnement lumineux.

6.3.2 Matériaux composites

On peut réaliser des ressorts en fibres de verre moulées dans une résine thermodurcissable et constituée de telle sorte que les fibres soient sollicitées en extension et la résine en cisaillement. La forte charge de rupture des fibres jointes au faible module d'élasticité de la résine permettent de fabriquer des ressorts très performants, mais généralement trop coûteux pour les applications courantes.

7. Procédés de fabrication

7.1 Fabrication des ressorts métalliques

La fabrication des ressorts métalliques consiste à mettre en forme des barres et des fils métalliques et à leur assurer des propriétés mécaniques voulues par des traitements thermiques et mécaniques.

Il existe deux procédés de fabrication des ressorts métalliques.

7.1.1 Fabrication à froid

Avec les métaux décrits au paragraphe 6.1, on forme des ressorts à froid ou à basse température. Toute déformation à chaud diminue les caractéristiques du métal et doit être localisée dans une zone de faible contrainte. Le chauffage, alors très localisé, se fait au chalumeau ou par induction.

Après formage les ressorts subissent pourtant un traitement thermique qui a surtout pour but d'éliminer les tensions internes ou contraintes résiduelles provenant du formage.

Cependant, certains ressorts formés en acier recuit et certains alliages non ferreux sont durcis après formage par traitement thermique.

Le fil rond tréfilé sert à la fabrication de ressorts de toutes formes et surtout de ressorts hélicoïdaux de compression, de torsion et de traction.

Les feuillards écrouis servent à la fabrication de ressorts plats de formes diverses.

La fabrication à froid comporte une suite d'opérations telles que : dévidage d'une botte, dressage, découpe, cintrage, enroulement, formage de plis et de crochets, préconformation.

Toutes ces opérations sont faites automatiquement sur une même machine à coulisseaux multiples qui débite un ressort à chaque cycle.

Elles sont suivies par des opérations de meulage des bases au lapidaire pour les ressorts de compression, d'ébavurage, etc.

Le traitement thermique en étuve vient ensuite, suivi éventuellement d'une préconformation à chaud et du grenailage.

La température de l'étuve pour les ressorts de soupape en acier s'élève à 250-280 °C. Pour d'autres ressorts, selon la nuance du métal et la température d'utilisation, on appliquera une température située entre 190 et 430 °C [8].

Des ressorts en acier rond et des barres stabilisatrices de diamètre compris entre 10 et 16 mm sont aussi fabriqués à froid à partir de fil écroui, mais à cause du taux d'écrouissage insuffisant à ce diamètre et de l'état de surface du métal, ils ne peuvent atteindre les performances des ressorts fabriqués à chaud.

Il en est de même de ressorts en acier prétraité, leur dureté ne peut être aussi élevée que celle des ressorts fabriqués à chaud, de crainte de rupture du fil au cours du formage, de l'enroulement ou des pliages.

Une protection par peinture termine la fabrication.

7.1.2 Fabrication à chaud

La fabrication à chaud des ressorts se fait à partir d'aciers laminés à chaud (§ 6.2). À condition de disposer d'un bon équipement, elle permet de fournir des ressorts de caractéristiques mécaniques meilleures que la fabrication à froid et s'applique donc à tous les ressorts à performances élevées ainsi qu'aux ressorts qui, par leurs formes ou leurs dimensions, ne peuvent être fabriqués à froid.

D'une manière générale, la fabrication à chaud comporte un traitement thermique par trempe et revenu intercalé entre des opérations de préparation du métal et les traitements mécaniques et de finition.

Tous les ressorts à lames multiples ou paraboliques qui servent à la suspension des véhicules, toutes les barres de torsion, la plupart des ressorts hélicoïdaux de suspension et des stabilisateurs et beaucoup d'autres ressorts sont fabriqués à chaud.

Pour la fabrication des ressorts à lames multiples, la préparation comprend le cisailage à longueur de chaque lame dans une barre d'acier plat laminé à chaud, le poinçonnage en son milieu, puis, pour les lames maîtresses et de renforcement, l'enroulage à chaud des extrémités, tandis que les extrémités des autres lames sont amincies à chaud sur un laminoir à cylindre excentré et découpées.

Après chauffage à une température voisine de 900 °C, toutes les lames sont cintrées entre deux calibres et, ainsi, maintenues, sont immédiatement trempées, le plus souvent à l'huile. Aussitôt après trempe, un revenu à une température très précise, choisie entre 400 et 500 °C selon la nuance d'acier, l'adoucit à la dureté requise.

Le traitement thermique est suivi du grenailage ou *shot peening* (§ 7.1.3) de la face de chaque lame destinée à travailler en extension.

Ensuite, toutes les lames étant graissées et assemblées, les ressorts sont préconformés (§ 7.1.4.4) et tarés. Le tarage consiste à vérifier que le ressort a bien la hauteur prévue à chaque charge imposée. Si le ressort est trop haut, on peut accentuer la préconformation.

Pour finir, le ressort est généralement peint au trempé.

La fabrication des ressorts paraboliques comprend, en plus, après cisailage à longueur, une opération de laminage à chaud sur un laminoir spécial dont l'écartement des cylindres est programmé en fonction de la longueur laminée, de façon que chaque section de chaque lame ait la longueur déterminée par le calcul.

La majorité des ressorts enroulés à chaud est faite à partir de barres d'acier rond dressées et écrouïtes après laminage.

La fabrication en grandes séries comprend un chauffage à 900 °C dans un four continu, l'enroulement selon un reproducteur et la trempe à l'huile suivie de revenue vers 420 °C et d'une préconformation à chaud, le *shot peening* (§ 7.1.3), le préconformation à froid (§ 7.1.4.4), le tarage et la finition.

Au tarage, on classe les ressorts en plusieurs catégories en fonction de la hauteur pour une charge déterminée. Après préconformation à chaud et à froid il n'est plus possible de retoucher la hauteur des ressorts. La finition comporte généralement une phosphatation, une peinture au trempé et un chauffage à une température d'environ 200 °C qui a un triple rôle : vieillissement du métal après les traitements mécaniques, élimination de l'hydrogène dû à la phosphatation, polymérisation de la peinture.

La fabrication à l'unité et en petite série s'applique à toutes sortes de ressorts utilisés dans l'industrie et en particulier aux ressorts de grandes dimensions, aux ressorts de torsion, de traction, aux ressorts en volutes, etc.

Un premier chauffage à une température inférieure à 900 °C sert à l'enroulement du ressort d'après un programme et au façonnage à chaud des extrémités. D'autres opérations peuvent être réalisées après refroidissement du ressort ou après un chauffage partiel : découpage, meulage des bases, modification du pas ou du diamètre d'enroulement de quelques spires, façonnage de crochets, etc.

Le ressort, éventuellement conformé dans un appareil, est réchauffé à une température de 860 à 900 °C, trempé et revenu, puis préconformé. Après des opérations éventuelles de dressage, de meulage, il subit un grenailage et éventuellement une préconformation définitive. La fabrication se termine par une protection contre la corrosion.

7.1.3 Shot peening

Le grenailage de précontrainte est couramment appelé *shot peening* pour bien le distinguer du grenailage appliqué au nettoyage des pièces et qui utilise des grenailles anguleuses.

Au contraire, le *shot peening* s'opère en frappant violemment la surface du métal avec une multitude de petites billes métalliques 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 0,5 mm [9].

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 shot peening 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.

Le shot peening des ressorts se pratique avec de la grenaille sphérique d'acier dur trempé et revenu dont la dureté doit être plus grande que celle des ressorts traités. Elle est projetée sur les ressorts par la force centrifuge que lui applique une turbine tournant à une vitesse de 1 000 à 3 000 tr/min. Des déflecteurs orientent la projection vers une zone bien déterminée où les ressorts circulent à vitesse constante.

Le grenaille qui s'use, et dont certains éléments se cassent, est triée après chaque passage et la poussière est éliminée.

Les contraintes résiduelles introduites par le grenailage peuvent être mesurées en laboratoire par enlèvement de couches successives à la surface du métal et en mesurant la déformation qui en résulte. Cette opération longue et délicate ne peut s'appliquer au contrôle d'une fabrication. De plus, les paramètres du grenailage sont nombreux : nature, forme, dimensions et dureté de la grenaille, vitesse et angle de projection, temps de passage sous la grenaille. On évalue son efficacité et l'on contrôle sa régularité en observant le recouvrement des impacts avec une lunette binoculaire et en mesurant la déformation de lamelles métalliques appelées éprouvettes Almen qui ont été soumises au même grenailage que les ressorts. Les éprouvettes sont coupées dans du feuillard d'acier laminé à froid et fixées sur un support (figure 8). Après passage sous la grenaille et détachées du support, elles présentent une courbure dont on mesure la flèche à l'aide d'un comparateur (figure 9). On appelle intensité Almen la mesure de cette flèche exprimée en centièmes de millimètres.

Le manuel américain sur le shot peening SAE J 808 a [11] définit plusieurs dimensions d'éprouvettes parmi lesquelles la plus utilisée pour le contrôle du shot peening des ressorts est l'éprouvette A. L'éprouvette C est utilisée pour les gros ressorts et les fortes intensités.

Le shot peening des petits ressorts peut se faire avec des micro-billes de verre ou d'oxydes réfractaires électrofondus [10]. La surface ainsi traitée garde un bon poli, mais l'intensité de grenailage qui est moindre est mesurée avec l'éprouvette N.

Une étude expérimentale très poussée a été menée sur le shot peening par le CETIM qui a publié plusieurs ouvrages qui font apparaître l'influence des divers paramètres [12] et les moyens pratiques à mettre en œuvre [13].

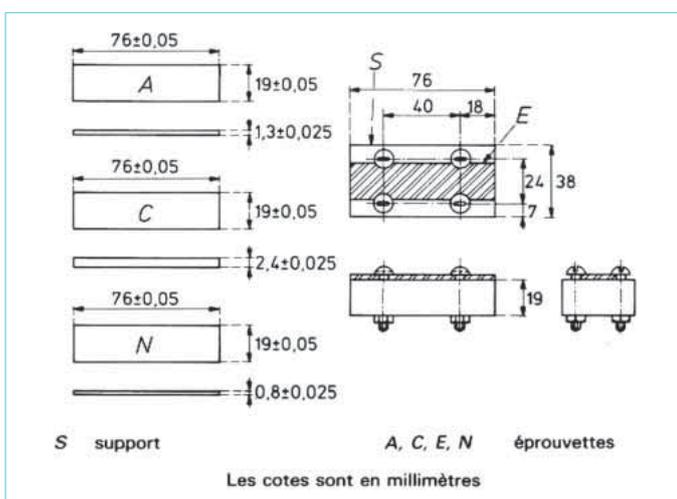


Figure 8 - Jauge Almen

7.1.4 Déformations à froid

7.1.4.1 Déformation élastique et déformation plastique

Nota : on se reportera à la rubrique *Calcul des structures* dans le traité Sciences fondamentales.

L'essai de traction d'une éprouvette en acier dur donne la courbe I tracée sur la figure 10, pour laquelle les déformations sont portées en abscisse et les contraintes en ordonnée.

Dans une première partie *OB* les contraintes sont sensiblement proportionnelles aux déformations. Le tracé est une droite. Si la contrainte est relâchée, l'éprouvette revient sensiblement à sa dimension initiale en passant par le même tracé. On dit que la déformation est élastique.

En augmentant les contraintes, au-delà du point *B*, le tracé s'infléchit, les déformations croissent plus rapidement que les contraintes. La courbe passe par un maximum *M* et décroît ensuite assez rapidement jusqu'à la rupture en *R*.

Mais si, en un point quelconque *C* de la courbe, on relâche la contrainte de l'éprouvette, le tracé suit la ligne *CD* sensiblement droite et parallèle à *OB*. Complètement déchargée l'éprouvette ne retrouve plus ses dimensions initiales. Elle s'est allongée et sa section a diminué. On dit que l'éprouvette a pris une déformation plastique.

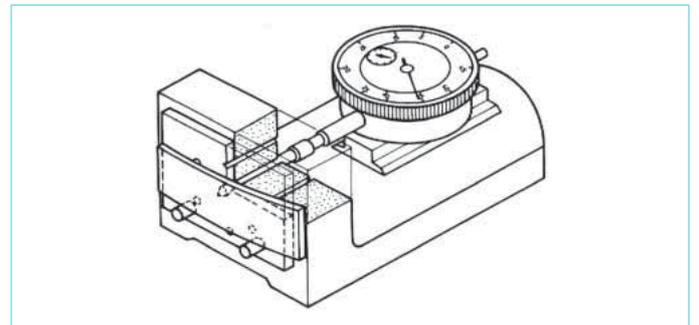


Figure 9 - Comparateur utilisé pour la mesure de la flèche Almen

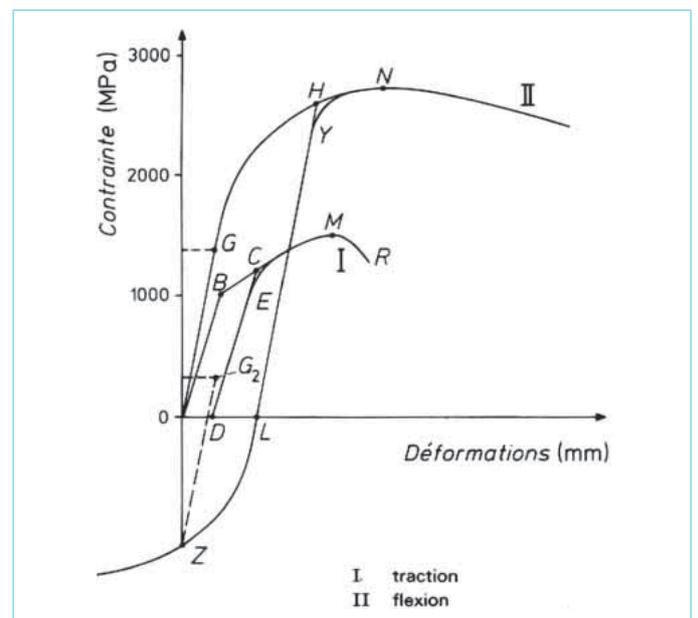


Figure 10 - Préconformation d'une éprouvette en acier dur

Cependant, en chargeant à nouveau, le tracé suit sensiblement la ligne DC jusqu'en un point E , voisin de C , où la contrainte est plus élevée qu'en B car le métal est écroui. À condition de ne pas dépasser ce point E , on peut charger et décharger, le tracé suit toujours la ligne DE . Cette déformation est élastique. Au-delà du point E , par contre, le tracé s'infléchit et la courbe rejoint et suit la ligne CMR jusqu'à la rupture. Un peu avant d'arriver en R on observe sur l'éprouvette une zone où la section diminue fortement et où l'éprouvette finit par casser.

7.1.4.2 Contraintes résiduelles

7.1.4.2.1 Flexion

Considérons l'essai de flexion qui se fait généralement en posant l'éprouvette parallélépipédique E sur deux appuis C et D et en exerçant sur cette éprouvette une force P à l'aide d'un bloc qui la reporte également aux points J et K disposés symétriquement par rapport au centre A de l'éprouvette (figure 11). La partie JK est alors soumise à une flexion circulaire que l'on mesure en A par un comparateur. On enregistre la contrainte normale superficielle qui est constante dans toute la partie JK , pour une charge donnée P , en fonction de la valeur de flexion mesurée par le comparateur.

Le tracé II de la figure 10 correspond à cet enregistrement. Il comprend une première partie OG où les contraintes sont sensiblement proportionnelles aux déformations. On remarque que la valeur de la contrainte en G est plus forte que celle de la contrainte en B relative à l'essai de traction.

Le tracé OG peut être parcouru dans les deux sens ; tant que l'on ne dépasse pas le point G , la déformation est élastique.

Au-delà de G , en augmentant les contraintes, le tracé s'infléchit lentement et passe en N par un maximum supérieur à M . Au-delà de N les contraintes diminuent mais l'éprouvette prend souvent une très grande déformation sans rupture.

Quand on relâche l'effort à partir d'un point H quelconque de la courbe, le tracé suit une droite HL sensiblement parallèle à OG .

L'éprouvette déchargée est déformée (figure 12), la partie JK est cintrée, mais sa section n'est pas réduite, même si le point N (figure 10) a été dépassé. La face supérieure S , comprimée, s'est raccourcie. La face inférieure T , tendue, s'est allongée.

En effet, considérons une section quelconque ST de la partie JK représentée à grande échelle dans la figure 13.

Tant que la déformation de l'éprouvette est élastique (parcours OG de la figure 10), les contraintes PP' , en chaque point P de la section ST , sont proportionnelles à la distance PI de ce point à la fibre neutre I . Portées en abscisse en fonction de la distance PI , les contraintes sont représentées par une droite oblique telle que VW .

Considérons maintenant les contraintes dans l'éprouvette quand la limite élastique superficielle est dépassée et que l'on est arrivé au point H sur le tracé de la figure 10. La valeur de contrainte superficielle donnée par ce tracé peut être reportée en SS_1 sur la figure 13.

À l'intérieur de la section ST les éléments plus proches de la fibre neutre ont une plus faible contrainte. Un point Q a une contrainte égale à la limite élastique, qui peut être représentée par QQ_1 : tous les points compris entre Q et R symétrique de Q par rapport à I ont une contrainte proportionnelle à leur distance au point I .

La droite Q_1R_1 donne la valeur de ces contraintes. Pour les points plus proches de la surface que le point Q la valeur des contraintes suit une courbe Q_1S_1 et une courbe R_1T_1 symétrique de Q_1S_1 par rapport à I . Tous les éléments de volume entre Q et S se sont comprimés plastiquement, tous les éléments de volume entre R et T se sont allongés plastiquement.

Si maintenant on relâche l'effort exercé sur l'éprouvette, tous ces éléments se détendent élastiquement, de même que l'éprouvette de traction déformée plastiquement jusqu'en C revient élastiquement par la ligne CD (figure 10). La contrainte en chaque point de l'éprouvette diminue d'une valeur proportionnelle à sa distance à la fibre neutre I .

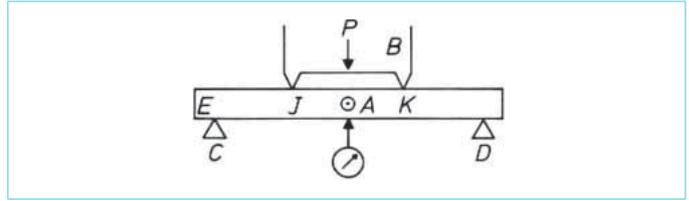


Figure 11 – Essai de flexion sur une éprouvette parallélépipédique

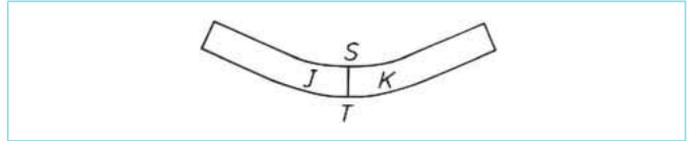


Figure 12 – Déformation de l'éprouvette de la figure 11 déchargée

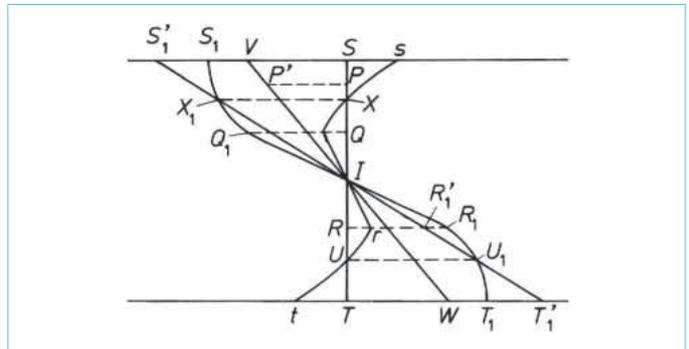


Figure 13 – Contraintes dans la section ST de l'éprouvette de la figure 12

L'énergie potentielle emmagasinée par la demi-section tendue (§ 3) est représentée par l'aire IR_1T_1T . L'énergie restituée est représentée par l'aire IT_1T dont le moment par rapport à la fibre neutre est le même que celui de l'aire IR_1T_1T . En chaque point de la section ST la contrainte atteinte est diminuée de la valeur donnée par la droite $T_1'I$ et son symétrique $S_1'I$.

En surface, la contrainte en T devient négative : $\vec{Tt} = \vec{TT}_1 - \vec{TT}'_1$, c'est une contrainte résiduelle de compression ; en S la contrainte résiduelle est en extension : $\vec{Ss} = \vec{SS}_1 - \vec{SS}'_1$. En U , correspondant au croisement U_1 de IR_1T_1 et de IT_1' , la contrainte résiduelle est nulle ; entre U et I , c'est une extension et inversement entre I et X .

L'éprouvette relâchée en L (figure 10) est déformée plastiquement :

- en compression dans tout le volume situé entre Q et S (figure 13) ;
- en extension dans tout le volume situé entre R et T .

Si l'on soumet l'éprouvette à un nouvel essai de flexion, elle se déforme élastiquement jusqu'au point Y voisin de H (figure 10). L'effet conjoint de l'écrouissage et de contraintes résiduelles opposées aux contraintes appliquées relève considérablement le niveau des contraintes qui peuvent être appliquées à l'éprouvette sans provoquer de nouvelles déformations permanentes.

Près de la fibre neutre, les contraintes résiduelles s'ajoutent aux contraintes appliquées, mais comme le total reste inférieur à la limite élastique, il n'y a pas non plus de déformation permanente.

7.1.4.2 Torsion

Des contraintes résiduelles peuvent être introduites par torsion.

Considérons, par exemple, une barre ronde soumise à un essai de torsion entre deux mors dont l'un tourne par rapport à l'autre quand on lui applique un couple croissant.

Dans un premier temps, l'angle de rotation, ou angle de torsion de la barre, sera proportionnel au couple appliqué. Puis, à partir d'une certaine valeur pour laquelle le métal atteint en surface sa limite d'élasticité en torsion, l'angle de torsion croît plus rapidement que le couple qui est appliqué. Le couple passe par un maximum et décroît ensuite jusqu'à rupture de la barre.

Si au cours de l'essai on réduit le couple appliqué, la rotation correspondante de la barre est élastique et proportionnelle à la variation de couple.

Si, après avoir dépassé la limite élastique en surface, on relâche la barre, elle reste tordue mais ses dimensions n'ont pas changé. Ses contraintes résiduelles de cisaillement sont du sens opposé aux contraintes auxquelles elle a été soumise.

De ce fait, et du fait de l'érouissage, elle peut supporter dans le même sens une torsion élastique plus grande qu'à l'origine. La section ne changeant pas, la torsion plastique appliquée à la barre peut atteindre un très grand angle sans rupture et sans modifier l'aspect extérieur de la barre, sauf les points d'ancrage en extrémité.

7.1.4.3 Effet Bauschinger

Nota : on se reportera à l'article *Formage des tôles fortes* [B 7 630] dans le traité Génie mécanique.

Si après avoir soumis une éprouvette à une déformation plastique on lui applique des contraintes opposées, les contraintes résiduelles sont de même sens et s'ajoutent aux contraintes appliquées, l'éprouvette se déforme plus vite que la première fois.

Retournons, par exemple, notre éprouvette de flexion (figure 12) et appliquons-lui une charge sur la face opposée.

Avec les contraintes résiduelles qui s'ajoutent aux contraintes appliquées la limite élastique est rapidement atteinte et le point représentatif des contraintes en fonction des déformations partant de L (figure 10) suit une courbe de même forme, mais opposée à la courbe GHN ; elle passe par un point Z où l'éprouvette est redressée. En continuant dans ce sens on trace une courbe analogue à GHN et l'on constate que la charge atteint rapidement une valeur maximale et décroît ensuite jusqu'à la rupture.

Si, au contraire, partant de Z on remet l'éprouvette dans sa position initiale en la chargeant, on retrouve en ZG_2 la courbe initiale, mais décalée de la valeur OZ . Dans ce sens-là aussi les charges et les contraintes sont beaucoup plus faibles.

C'est l'effet Bauschinger qui, on le voit, diminue beaucoup les propriétés du métal. Toute déformation plastique du métal et notamment la fabrication à froid doit être conduite de façon à l'éviter.

7.1.4.4 Préconformation

La préconformation d'un ressort consiste à le mettre dans un état de contraintes résiduelles favorables en appliquant un procédé analogue à celui de déformation à froid (§ 7.1.4.1) d'une éprouvette.

La préconformation s'applique aux ressorts subissant des contraintes constantes, ou des cycles de contraintes répétées ou ondulées.

Elle doit être absolument proscrite pour les ressorts subissant des contraintes alternées; leur durée de vie serait considérablement réduite par suite de l'effet Bauschinger. Pour les ressorts susceptibles d'être soumis à des contraintes négatives, il est très important d'en connaître les valeurs dès la conception du ressort et de limiter leur préconformation en conséquence.

Le formage à froid introduit des contraintes résiduelles souvent défavorables dont il faut tenir compte pour appliquer la préconformation.

Dans bien des cas, la préconformation s'opère simplement en déformant le ressort de façon permanente par application d'une surcharge. Il est évident que la déformation permanente doit avoir été prévue et que la mise en forme du ressort doit en avoir tenu compte. On contrôle alors la préconformation en vérifiant que le ressort a atteint sa forme définitive.

Les différentes parties d'un ressort qui ne travaillent pas également doivent être préconformées différemment. On y parvient en les préconformant séparément et parfois en les forçant à s'appliquer sur des calibres de forme appropriée.

Plusieurs types de ressorts (ressorts à lames, barres de torsion) présentent, vis-à-vis de la préconformation, des particularités qui seront expliquées en même temps que la fabrication de ce ressort.

7.2 Fabrication des ressorts en caoutchouc

Nota : on se reportera à la rubrique *Élastomères* dans le traité Plastiques et Composites.

La forme des ressorts en caoutchouc est, le plus souvent, obtenue par moulage d'un mélange (§ 6.3) que l'on vulcanise par chauffage. Le mélange comprend un élastomère composé de chaînes moléculaires très longues; il a une grande plasticité mais pas d'élasticité.

L'élasticité est obtenue par la vulcanisation. Le chauffage à une température de 150 à 200 °C augmente la plasticité du mélange, facilite son moulage et provoque en même temps sa vulcanisation à l'aide de l'agent de vulcanisation incorporé, qui établit entre les chaînes moléculaires des liaisons chimiques qui régissent leur position relative et fixent la forme du produit.

Le moulage se fait par compression ou par injection dans un moule en plusieurs parties délimitant entre elles un espace confiné. Par compression, l'ébauche en caoutchouc cru est compressée entre les différentes parties du moule chauffé à la vapeur ou par des résistances électriques. Après un temps de maintien nécessaire pour assurer la vulcanisation, les parties du moule seront écartées. Le caoutchouc étant peu conducteur de la chaleur, celle-ci se transmet lentement au mélange qui vulcanise plus rapidement au contact du moule qu'à l'intérieur. On n'obtient un produit homogène que par une vulcanisation lente et donc coûteuse. Le produit sorti du moule qui a débordé dans des rainures, ou coupe-gomme, prévues à cet effet, est ébavuré. Après refroidissement et vieillissement d'un jour ou deux pour parfaire les liaisons chimiques il constitue le ressort en caoutchouc.

Des ressorts en caoutchouc filiforme (ressorts de traction) peuvent être obtenus au moyen d'une boudineuse, par extrusion d'un mélange fortement comprimé par une vis à travers une filière. La vitesse de passage dans la filière doit être réglée pour que le mélange s'échauffe jusqu'à, au moins, 95 °C. Des accélérateurs de vulcanisation sont couramment utilisés mais doivent être soigneusement dosés pour assurer la vulcanisation sans risquer qu'elle ne se produise précocement dans la filière.

Le moulage par injection se fait dans une machine analogue à une boudineuse associée à un moule. Le mélange échauffé et rendu visqueux par passage à travers une filière est introduit dans le moule qu'il remplit complètement et duquel il peut être sorti presque aussitôt à sa forme définitive. À cause de la température atteinte et des accélérateurs de vulcanisation, incorporés au mélange, un temps relativement court suffit à compléter la vulcanisation avant utilisation.

Certains ressorts en caoutchouc et notamment ceux qui travaillent au cisaillement comportent des armatures métalliques adhésives au caoutchouc. Parmi les procédés d'adhésion du caoutchouc au métal, celui qui est le plus couramment utilisé pour les ressorts en caoutchouc consiste à vulcaniser le caoutchouc au contact du métal préalablement recouvert d'un produit adhésif dont la nature varie avec l'élastomère inclus dans le mélange (par exemple, on utilisera

du *Chemosil* de la société SAFIC-ALCAN avec du caoutchouc naturel). La préparation du métal par sablage ou grenailage ainsi que l'application du produit adhésif doivent être conduites avec un très grand soin pour éviter toute pollution des surfaces.

Au chauffage, la vulcanisation réalise les liaisons chimiques, non seulement à l'intérieur du caoutchouc, mais également entre le caoutchouc et le produit adhésif et entre le produit adhésif et le métal.

On considère que l'adhésion est bonne quand la force de liaison du caoutchouc avec le métal est supérieure à la cohésion du caoutchouc lui-même.

8. Facteurs influençant la durée de vie d'un ressort métallique

La durée de vie d'un ressort est limitée soit par la rupture, soit par le fluage. Elle dépend du matériau et de sa mise en œuvre ainsi que des conditions dans lesquelles le ressort est utilisé.

Nous examinerons indépendamment le cas des ressorts métalliques et des ressorts en caoutchouc.

8.1 Le métal et sa mise en œuvre

Dans les conditions ordinaires de service, le choix de la matière destinée à la fabrication du ressort se porte dans la majorité des cas sur un acier (§ 6.1 et 6.2).

Pour un ressort métallique soumis à la fatigue, ce qui importe avant tout pour la durée de vie ce sont les conditions d'état de surface telle que la dureté superficielle, la décarburation, la rugosité, les replis de laminage, les griffes d'outils, les inclusions proches de la surface, la grosseur du grain, etc.

Le choix de la nuance et de son élaboration n'intervient, le plus souvent, que par son influence sur les facteurs énumérés ci-avant.

8.1.1 Dureté

La dureté améliore la résistance au fluage, la dureté superficielle améliore la résistance à la fatigue dans la mesure où la diminution de résilience qui accompagne une grande dureté n'accentue pas trop la nocivité des défauts de surface. Autrement dit, on augmente la durée de vie en augmentant la dureté à condition de diminuer les imperfections de la surface.

8.1.2 Décarburation

Dans la fabrication à chaud des ressorts en acier, le chauffage à l'air à une température dépassant 650 °C provoque une décarburation qui augmente avec la durée et fortement avec la température (figure 14) [14]. La décarburation est néfaste parce qu'elle diminue la dureté superficielle en diminuant la teneur en carbone nécessaire à la trempe, mais elle réduit simultanément la sensibilité à l'entaille et la nocivité des petits défauts superficiels.

Au total, on estime qu'une diminution de la teneur en carbone initiale inférieure à 50 % n'affecte pas sensiblement la durée de vie d'un ressort. Cela est confirmé par une étude expérimentale faite par E. Sikora sur des éprouvettes en acier 55 C3 non grenillées et essayées en torsion alternée.

Des courbes de Wöhler (figure 15) donnent les résultats des essais de fatigue pour des teneurs superficielles en carbone de 30, 50, 75 et 100 %.

Quand la décarburation est totale, une couche d'acier superficielle est transformée en ferrite ; elle est particulièrement nocive quand elle s'insinue entre les grains et diminue ainsi leur cohésion. Tous les aciers ne sont pas également sensibles à la décarburation. La figure 16 donne des indications sur l'épaisseur de la couche de ferrite atteinte en une heure de séjour dans un four ouvert à l'air libre selon la température et pour différents aciers à ressort.

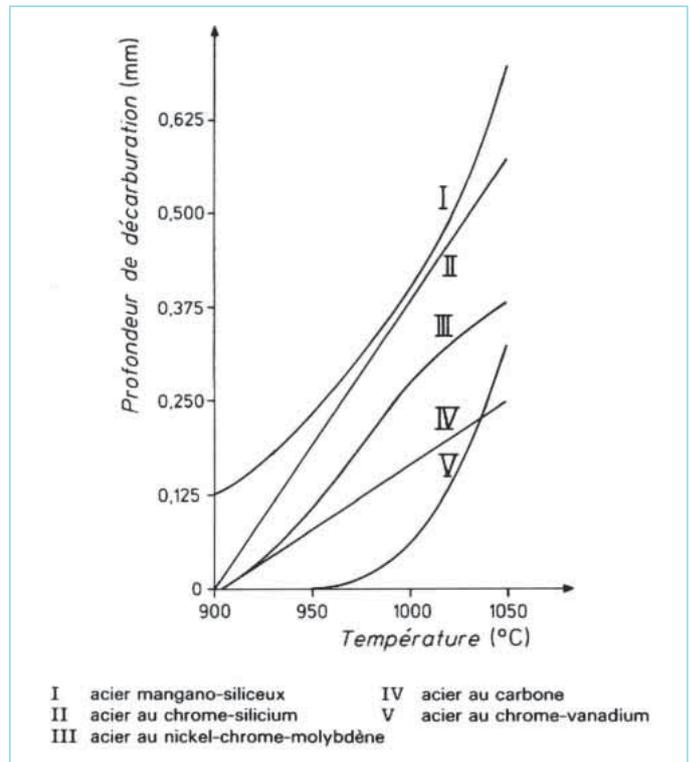


Figure 14 - Profondeur totale de décarburation en une heure de séjour dans un four ouvert

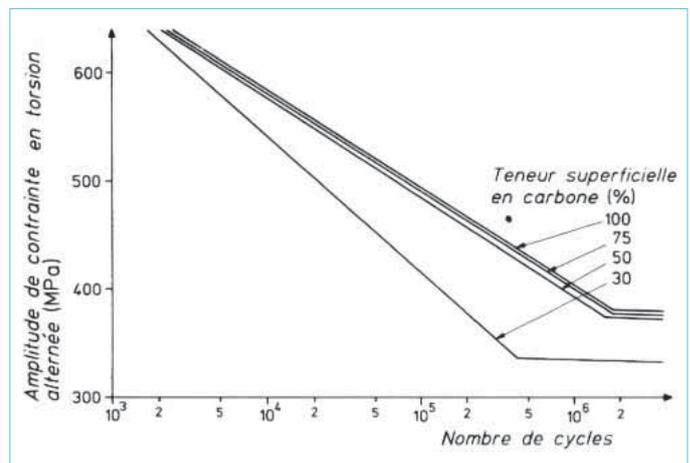


Figure 15 - Influence du taux de décarburation sur la durée de vie d'un acier 55 C 3 non grenillé (d'après E. Sikora)

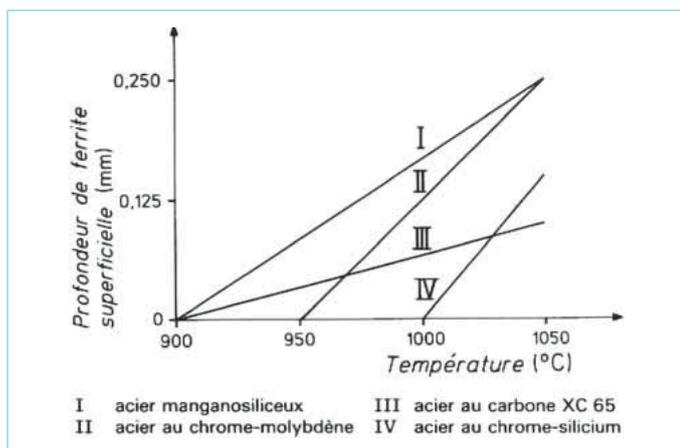


Figure 16 – Décarburation totale superficielle d'aciers en une heure de séjour dans un four ouvert

Le professeur Zoubov [15] fait remarquer la diminution de la résistance à l'oxydation ainsi que la moindre résistance au choc des ressorts décarburés et conseille le chauffage dans un bain protecteur.

Le chauffage en atmosphère oxydante et la présence de certains éléments d'alliage peuvent s'opposer à la décarburation en formant une couche d'oxyde qui protège le métal, puis se détache sous forme de battitures en éliminant le métal précédemment décarburé, au cours du laminage, par exemple.

On élimine la décarburation et les défauts de surface des aciers ronds laminés à chaud par un écroûtage à la meule ou à l'outil avant fabrication des ressorts et l'on prend, au cours de cette fabrication, des précautions pour maintenir la décarburation dans les limites admissibles.

8.1.3 Rugosité

La rugosité provenant de l'écroûtage cité ci-avant a une influence sensible sur la durée de vie des ressorts [16]. La figure 17 donne selon la rugosité un coefficient de réduction des amplitudes de contraintes admissibles, par rapport à l'état parfaitement poli. Les progrès faits dans les machines et les outils permettent actuellement, au moins pour les ressorts de suspension d'automobile, d'obtenir par écroûtage à l'outil un état de surface meilleur que le rectifié et proche du poli.

Les aciers ronds destinés au tréfilage sont enroulés en couronne après laminage et ne peuvent être écroûtés que par des procédés trop coûteux pour être couramment appliqués. Ils sont donc tréfilés sur brut. La couche décarburée due au laminage est seulement amincie, tandis que les imperfections de surface sont allongées et forment des défauts longitudinaux qui réduisent la durée de vie des ressorts travaillant en torsion, la direction des contraintes principales étant inclinée à 45° par rapport à l'axe de la barre.

Par contre, le tréfilage diminue beaucoup la rugosité et cela d'autant plus que le diamètre du fil tréfilé est plus petit et que le métal plus écroui est plus dur.

8.1.4 Replis de laminage. Griffes. Angles vifs. Incrustations

L'écroûtage des plats n'étant pratiquement pas possible, la qualité de surface, et donc la durée de vie des ressorts fabriqués en acier plat laminé à chaud, dépendent essentiellement des conditions et de la qualité du laminage.

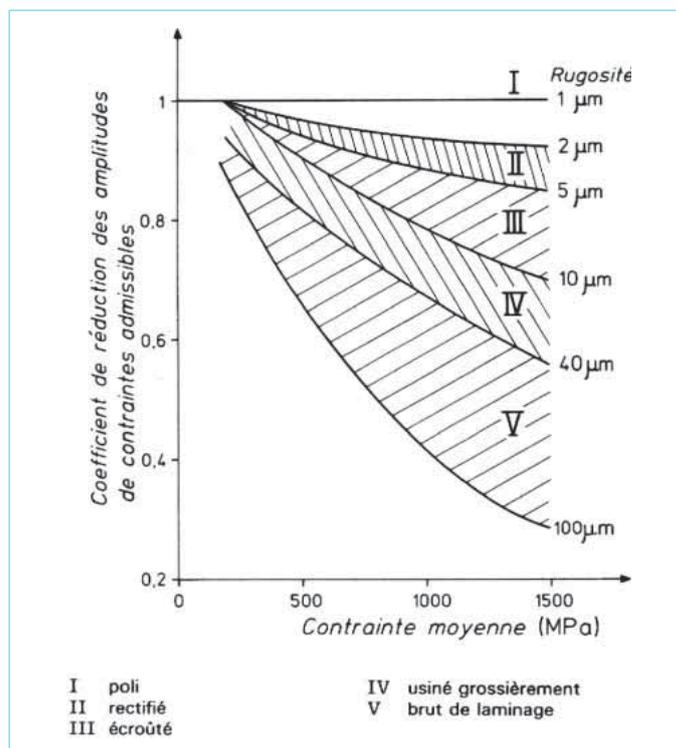


Figure 17 – Effet de l'état de surface en contraintes alternées

Les repliures, les incrustations de calamine, les sillons et griffes de laminage ne peuvent être tolérés que s'ils ont moins de 0,2 mm de profondeur et s'ils sont bien parallèles au laminage. Ils réduisent beaucoup la durée de vie quand ils sont obliques ou transversaux.

Pour les ressorts à lames, l'arrondi des chants et, mieux encore, les chants demi-ronds (en forme de demi-cercle) allongent la durée de vie, quoique les contraintes soient légèrement plus élevées.

Quand l'acier doit être utilisé brut de laminage, on préfère les nuances au chrome 45 C 4 pour les épaisseurs inférieures à 7 mm et 50 CV 4 pour les épaisseurs supérieures, à cause de leur meilleur état de surface, leur calamine étant friable et ne formant pas d'incrustations.

8.1.5 Inclusions

Les inclusions qui apparaissent au cœur du métal à la solidification de l'acier sont rarement gênantes, mais celles qui sont proches de la surface amènent des concentrations de contraintes, elles peuvent aussi être la cause d'arrachements quand le métal est usiné en cours de fabrication, ou de tapures quand il est traité thermiquement. Dans tous ces cas elles constituent des amorces de rupture pour le ressort [17].

8.1.6 Grain

Un grain grossier, résultant d'un corroyage insuffisant ou d'un maintien trop long à haute température, diminue la résilience (figure 18).

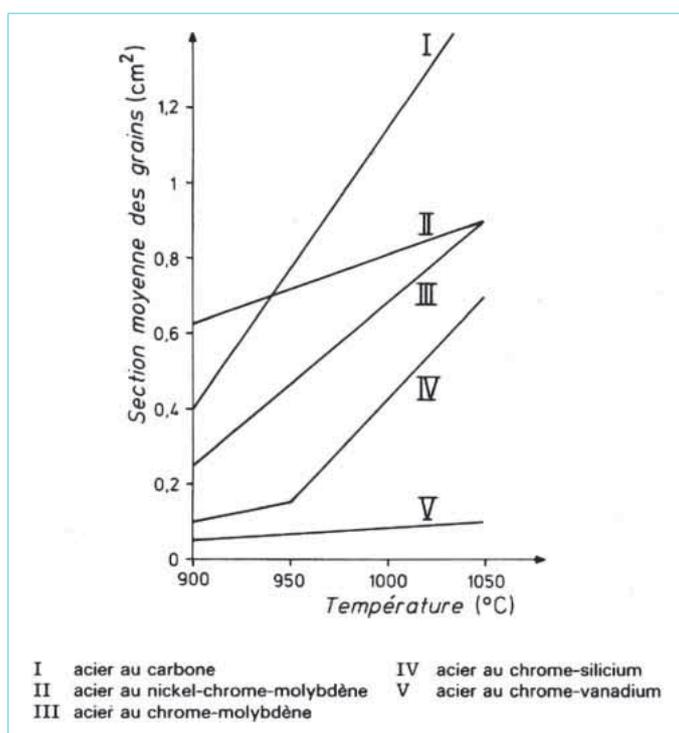


Figure 18 – Grossissement du grain en 8 h de séjour à haute température

8.1.7 Interaction des différents facteurs

La dureté du métal résultant de l'écroutissage ou du traitement thermique doit être choisie en fonction de l'état de surface du ressort fini. Les valeurs communément admises sont au maximum de 46 HRC pour les ressorts fabriqués en acier brut de laminage, de 48 HRC pour les aciers laminés à froid, étirés ou tréfilés de relativement grosse section (8 à 10 mm) et de 52 HRC pour les aciers ronds de même section soigneusement écroutés ou rectifiés.

Les plus grandes durées de vie coïncident avec les duretés maximales [18]. Toutefois, la durée de vie des ressorts et surtout de ceux qui sont soumis à des chocs ou à des vibrations peut être considérablement réduite par un manque de résilience provenant de la conjugaison d'une dureté élevée et de la présence d'arêtes vives, de trous, de replis, de découpages, de traces de meulage en travers, d'éclaboussures de soudage, etc., ou d'un grain grossier. Une dureté plus faible permet alors parfois de garder une résilience suffisante. Une trempe bainitique peut alors être un facteur d'augmentation de la durée de vie [19].

Au contraire, pour des ressorts sans discontinuités, ni défauts, on augmentera la dureté par une trempe superficielle sur des barres de torsion, par une nitruration [20] sur des ressorts hélicoïdaux (figure 19).

8.1.8 Shot peening

L'expérience a montré que le procédé le plus efficace pour allonger la durée de vie des ressorts soumis à la fatigue était le *shot peening* ou grenailage de précontrainte ; il est, pour cette raison, devenu l'une des opérations importantes de la fabrication des ressorts et doit être effectué selon certaines règles décrites au paragraphe 7.1.3.

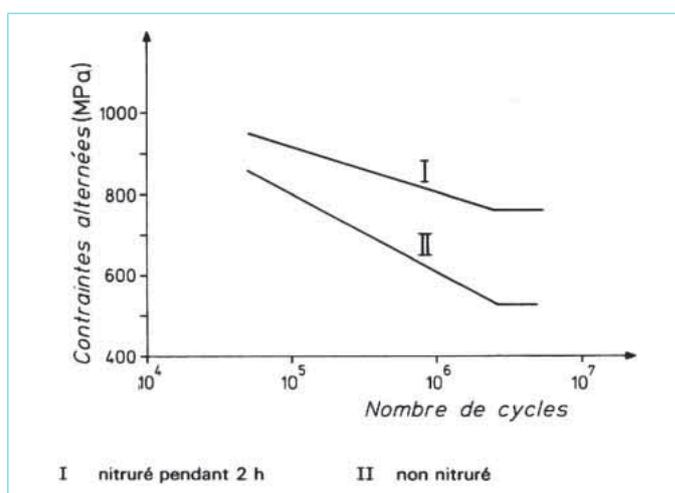


Figure 19 – Influence de la nitruration sur des ressorts hélicoïdaux en fil de 5 mm de diamètre

Ce procédé a l'avantage de s'appliquer à presque tous les ressorts et d'atténuer l'action néfaste des défauts de surface et des irrégularités constructives. Il doit être exécuté en fin de fabrication après tous les usinages, marquages et chauffages. Un chauffage au-dessus de 150 °C réduit son influence ; un meulage annule son effet.

8.1.9 Échelle

À contrainte égale, les petites sections de métal résistent mieux. Les ressorts de petites dimensions peuvent travailler en fatigue à des contraintes plus élevées et durer plus longtemps.

8.1.10 Fluage

La résistance au fluage concerne à la fois les ressorts soumis à la fatigue et ceux qui ne supportent que des contraintes statiques. On réduit le fluage par la dureté et la préconformation (§ 7.1.4.2), (§ 7.1.4.3) et (§ 7.1.4.4), qui améliorent en même temps la résistance à la fatigue.

8.2 Conditions d'utilisation

8.2.1 Corrosion

La durée de vie des ressorts est considérablement affectée par la corrosion et notamment par la corrosion fissurante sous contrainte, la valeur de contrainte alternée que peut supporter le métal étant fortement réduite par la dégradation de l'état de surface due à la corrosion [21]. La figure 20 donne un ordre de grandeur du coefficient de réduction appliqué dans les cas de corrosion en eau douce et en eau de mer.

La corrosion se développe particulièrement aux points de fixation ou d'appui des ressorts et aux points de contact entre eux des éléments de ressorts : appui des ressorts hélicoïdaux dans leurs coupelles et contacts des spires entre elles, encastrement des ressorts à lames dans leur bride et frottement des lames entre elles, encastrement des têtes de barres de torsion dans leur logement.

Ces contacts provoquent une sorte de grippage appelé *fretting* qui maintient le métal nu au contact de l'agent corrosif en enlevant les oxydes à mesure qu'ils se forment.

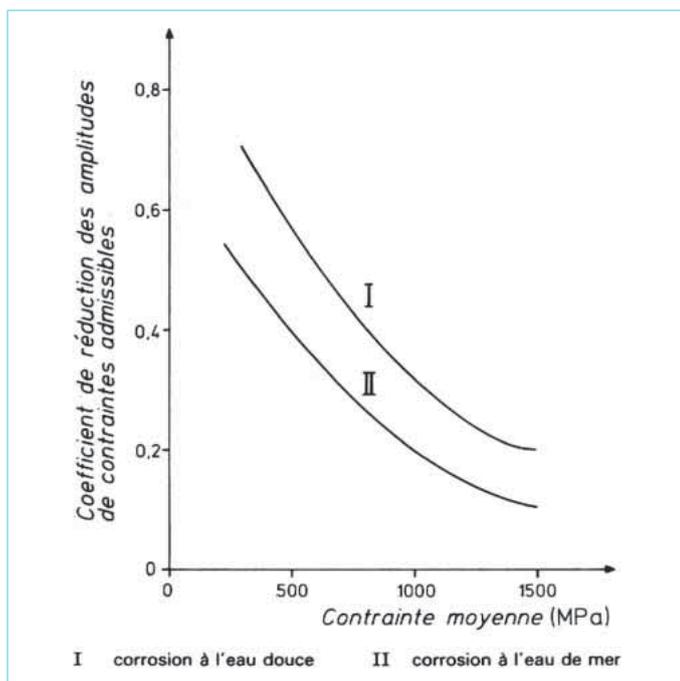


Figure 20 – Effet de la corrosion en contraintes alternées

La protection des ressorts dans ces zones de contact n'est pas facile à assurer à cause des déplacements relatifs et des fortes pressions localisées qui se produisent. Aussi cherche-t-on le plus possible à éviter les contacts directs ; si c'est nécessaire, on dispose des gaines ou des intercalaires en matière plastique dans les zones de contact.

Le revêtement des parties métalliques est, de plus, réalisé par une peinture appliquée après une phosphatation du métal qui améliore l'adhérence.

Les petits ressorts peuvent être protégés par un revêtement métallique [22] en zinc, cadmium, nickel, plomb, etc. selon le type de corrosion auquel le ressort est soumis.

Il n'est généralement pas possible d'appliquer la même protection aux gros ressorts hélicoïdaux, les pressions y atteignent ponctuellement de telles valeurs que le revêtement ne résiste pas. Les gros ressorts hélicoïdaux fortement sollicités (pour voiture de chemin de fer, par exemple) sont protégés par un revêtement de *Rilsan* de 0,3 mm appliqué au bain fluidisé en deux couches, la première étant une couche de liaison au métal [23].

Les ressorts à lames multiples posent un problème particulier avec les lames qui doivent glisser librement les unes par rapport aux autres et la nécessité de leur protection contre la corrosion atmosphérique : les uns, après un grenailage intense et parfois une phosphatation sont simplement enduits d'une épaisse couche de graisse, les autres sont graissés entre lames et peints sur toutes les autres faces. Pour les chemins de fer cette peinture est une

peinture bitumineuse très épaisse (300 μm) appliquée au trempé. Sa plasticité est suffisante pour permettre tous les mouvements des lames sans rupture du revêtement protecteur.

Les ressorts à lames paraboliques et quelques autres sont généralement protégés par une peinture contenant un très fort pourcentage de zinc pulvérulent lié par une résine époxyde. Dans ce cas, et d'autres cas analogues, on cherche à éviter le mieux possible les fentes et les creux susceptibles de retenir l'humidité et de former ainsi une pile à oxygène.

8.2.2 Température

Une température élevée, dépassant 200 °C, amène un vieillissement du métal et une diminution des contraintes résiduelles, notamment de celles qui sont dues au grenailage et à la préconformation. Les contraintes admises doivent en tenir compte.

Les basses températures fragilisent le matériau surtout en cas de forte dureté. Il faut de préférence choisir les nuances d'acier au vanadium (50 CV 4), au chrome-nickel-vanadium ou au nickel. Tout effet d'entaille doit être soigneusement évité surtout si le ressort est soumis à des températures inférieures à - 20 °C.

8.3 Le caoutchouc

La vulcanisation à chaud établit des liaisons entre les molécules qui donnent au caoutchouc son élasticité et évitent qu'il ne flue quand il est soumis à une charge constante. Une vulcanisation trop longue ou à trop haute température forme trop de liaisons, durcit le caoutchouc et diminue donc son élasticité. Le même résultat se produit à l'utilisation quand le caoutchouc s'échauffe par un travail trop intense.

En effet, le cycle de déformation des ressorts en caoutchouc présente toujours une hystérésis due à la transformation en énergie thermique d'une partie de l'énergie qui est fournie.

Si la température qui en résulte n'atteint pas la température de début de vulcanisation (90 °C environ), l'état du caoutchouc n'est pas modifié ; mais, le caoutchouc étant mauvais conducteur de la chaleur, un cycle de travail reproduit à trop grande fréquence l'échauffe et l'endommage. Un ressort en caoutchouc ne peut supporter des cycles de travail intense que s'ils sont espacés, sinon il durcit et se dégrade. Le fabricant du ressort en caoutchouc peut le prémunir contre ce vieillissement en diminuant la teneur en accélérateurs de vulcanisation ou en ajoutant des retardateurs.

Les surfaces exposées à l'air, surtout si elles sont tendues, subissent des altérations et des craquelures. On les protège contre l'oxydation en ajoutant au mélange des anti-oxygènes tels que les amines et leur dérivés.

Les surfaces exposées à la lumière sont sujettes aux mêmes détériorations, elles peuvent être protégées par des cires et des paraffines et pour certains caoutchoucs par des produits spécifiques ajoutés au mélange : par exemple, du dibutyldithiocarbamate de nickel (NBC) ou de l'héliozone (du Pont).

par **Michel DUCHEMIN**

Ingénieur de l'Institut Catholique d'Arts et Métiers de Lille
Ingénieur de l'École Supérieure de Soudure Autogène de Paris
Chef de Produit ferroviaire à la Société Ressorts Industrie

Bibliographie

+ historique de la question

* étude théorique de la question

Δ comporte des résultats d'essais de laboratoire

▲ comporte des résultats pratiques ou industriels

○ étude technologique de la question

□ description d'appareillages ou d'installations

Références des articles

- [1] PASSERAT (M.). – *Le fil pour ressorts métalliques*. Fil, Tubes, Bandes et Profilés (F), n° 59, p. 15-26, 10 fig., bibl. (7 réf.) (* ▲ ○), juin 1977.
- [2] CHIRONIS (N.). – *Spring design and application* (Étude et application du ressort), 344 p., McGraw-Hill (Δ ▲) (1961).
- [3] DE VILLEROUCHE (M.). – *Formage à froid des fils inoxydables*. Aciers Spéciaux (F), n° 9, p. 5-10, 8 fig., 1 tabl. (▲) (1969).
- [4] FUNKE (P.) et KAYSER (K.H.). – *Statische und dynamische Untersuchungen an Federn aus sieben verschiedenen Federdrahten nach DIN 17224* (Recherches statiques et dynamiques en ressorts de sept fils d'aciers différents selon DIN 17224). Draht (D), 22^e année, n° 4, avril 1971 ; p. 189-96 ; et n° 5, p. 315-28, 31 fig., 12 tabl., bibl. (19 réf.) (+ * Δ ▲), mai 1971.
- [5] BACKER (L.). – *Aciers pour ressorts hélicoïdaux dans les véhicules automobiles*. Aciers Spéciaux (F), n° 44, p. 1923, 1 tabl. 6 fig., bibl. (3 réf.) (Δ), déc 1978.
- [6] WALZ (K.H.). – *Ressorts en acier et les problèmes de leurs matériaux*. Le Tréfilé (F), 26^e année, n° 4, p. 146-53, 7 fig., 9 tabl. (* Δ ▲), juil.-août 1976.
- [7] GENING (G.) et MORISSON (B.). – *Encyclopédie technologique de l'industrie du caoutchouc*. Tome II, 784 p., bibl. (900 réf.), Dunod (+ * Δ ▲ ○) (1960).
- [8] ELMENDORF (H.J.). – *Selection of steels for springs* (Sélection d'aciers pour ressorts) Metal Progress (USA), p. 80-4, 4 tabl., 6 fig. (Δ ▲), avril 1958.
- [9] NIKU-LARI (A.). – *Le grenailage de précontrainte. Utilisation en mécanique*. CETIM-Information (F), n° 57, p. 62-9, 15 fig., 2 tabl., bibl. (14 réf.) (Δ), oct. 1978.
- [10] NIKU-LARI (A.). – *Essais comparatifs de grenaille*. CETIM-Information (F), n° 62, p. 69-73, 7 fig., 3 tabl., bibl. (3 réf.) (Δ), oct. 1979.
- [11] SAE *Manuel on shot peening SAE J 808 a* (manuel sur le shot peening). Soc. Automotive Engrs (* Δ ▲), (1967).
- [12] FLAVENOT (J.F.) et NIKU-LARI (A.). – *Le grenailage de précontrainte*. 99 p., bibl. (106 réf.), Notes Techn. CETIM, n° 15 (* Δ) (1976).
- [13] *Le grenailage de précontrainte*. 98 p. – Journée d'Étude du GAMI et du CETIM du 16 nov. 1976, École Nationale Supérieure des Techniques Avancées (* ▲ ○ □).
- [14] KENNEFORD (A.S.) et ELLIS (G.C.). – *A comparison of six spring steels. Part 1: Hardenability and resistance to grain growth and decarburation* (Une comparaison de six aciers à ressorts. 1^{re} partie : Trempabilité et résistance au grossissement du grain et à la décarburation). J. Iron Steel Inst. (GB), p. 265-77, 22 fig., 8 tabl., bibl. (10 réf.) (Δ ▲), mars 1950.
- [15] ZOUBOV (B.). – *Échauffement des aciers à ressorts dans un bain fluidisé chaud*. Revue russe Industrie automobile, n° 3, p. 36-7, 2 fig., 3 tabl., bibl. (2 réf.) (Δ ▲) (1971).
- [16] HEMPEL (M.). – *Werkstoffkennwerte bei Dauerfestigkeits Untersuchungen* (Caractéristiques des matières en essais de fatigue). Draht (D), 22^e année, n° 9, p. 635-7, 5 fig., 1 tabl. (* Δ ▲), sept. 1971.
- [17] MARTOT (J.L.), HUGO (M.) et BRUNET (J.C.). – *Influence de l'état de surface sur la résistance à la fatigue des aciers pour ressorts traités*. Traitement Thermique (F), n° 50, p. 29-36, 10 fig., 1 tabl., bibl. (14 réf.) (Δ ▲), déc. 1980.
- [18] KAISER (B.). – *Einfluss der Oberflächengüte von Schraubenfedern auf das Dauerfestigkeitsverhalten* (Influence de la qualité de surface des ressorts hélicoïdaux sur la résistance à la fatigue). Maschinenmarkt (D), n° 61, p. 1261-4, 6 fig., bibl. (46 réf.) (Δ) (1982).
- [19] TAUSCHER (M.). – *Der Einfluss der Zwischentufenvergütung auf die Dauerfestigkeit von Stahl* (L'influence de la trempe étagée sur la limite de fatigue de l'acier). Draht (D), 15^e année, n° 8, p. 519-21, 6 fig., bibl. (17 réf.) (+ Δ), août 1964.
- [20] WALZ (K.) et REITMAN (M.). – *Einfluss des Nitrierens auf die Wechsel Festigkeit* (Influence de la nituration sur la résistance à la fatigue alternée). Draht (D), 19^e année, n° 8, p. 624-30, 16 fig., 6 tabl., bibl. (13 réf.) (Δ), août 1968.
- [21] SANZ (G.). – *Application de la mécanique de la rupture à l'étude de la fissuration et de la rupture par corrosion sous tension*. Mécanique. Matériaux. Électricité (F), n° 225, p. 3-12, 20 fig., bibl. (41 réf.) (Δ), mars 1971.
- [22] HEIMKE (J.). – *Entwicklungsstand und Bewertung von Metallüberzügen für Federn und Federstahl Drähte* (État des développements et évaluation des revêtements métalliques pour ressorts et fils d'acier à ressorts). Draht (D), 20^e année, n° 6, p. 422-8, tabl., bibl. (21 réf.) (Δ ▲), juin 1969.
- [23] REVILLON (A.) et LELUAN (A.). – *Une détermination des ressorts en hélice*. Rev. Gén. Chemins de Fer (F), 93^e année, p. 442-5, 18 fig., 3 tabl. (* Δ), juil.-août 1974.
- [24] WELLS (J.). – *Wave springs* (Ressorts ondulés). Machine design (USA), 42, n° 20, p. 113-5 (* Δ), 20 août 1970.
- [25] GROSS (S.). – *Berechnung und Gestaltung von Metallfedern* (Calcul et réalisation des ressorts métalliques). 156 p., bibl. (47 réf.). Springer Verlag (* Δ ▲) (1960).
- [26] WAHL (A.M.). – *Mechanical springs* (Ressorts mécaniques). 323 p. (nombr. réf.), McGraw Hill (* Δ ▲) (1963).
- [27] WAHL (A.M.) et LOBO (G.). – *Stresses and deflections in flat circular plates with central holes* (Contraintes et déflexions dans les plaques circulaires plates avec trou central). Trans. ASME (USA), 52, p. 29 (* Δ) (1930).
- [28] TIMOSHENKO (S.). – *Strength of materials* (Résistance des matériaux). 2^e partie, p. 140, Van Nostrand Co. (* Δ) (1955).
- [29] ALMEN (J.O.) et LASLO (A.). – *The uniform section disk spring* (Le ressort disque de section uniforme). Trans. ASME (USA), 58, p. 306 (* Δ ○) (1936).
- [30] BÜHL (P.). – *Zur Berechnung von Tellerfedern mit Auflageflächen* (Calcul de rondelles Belleville avec surface d'appui). Draht 17, n° 10, p. 753-7, 12 fig., bibl. (8 réf.), Probst und Meier Verlag (* Δ ▲) (1966).
- [31] WERWITZ (W.). – *Die Tellerfeder* (La rondelle Belleville). Konstruktion. Vol. 6, p. 361-76 (* Δ) (1954).

RESSORTS

- [32] *Manuel on design and application of leaf springs* (Manuel sur la détermination et l'application des ressorts à lames). SAE HS J 788, Soc. Automotive Eng. (* Δ ▲ ○), avril 1981.
- [33] *Manuel on design and manufacture of torsion bar springs* (Manuel sur la détermination et la fabrication des barres de torsion). SAE HS J 796, Soc. Automotive Eng. (* Δ ▲ ○), sept. 1981.
- [34] LIESECKE (GG.). – *Berechnung Zylindrischer Schraubenfedern mit Rechteckigen Draht Querschnitt* (Calcul de ressorts en hélice cylindrique en fil de section rectangulaire). ZVDI 77, p. 425 à 892 (* Δ) (1983).
- [35] VAN WYNGAARDEN (A.). – *Bierzerno anniversary volume*. Anvers (1953).
- [36] SCHULE (W.). – *Établissement du module d'élasticité relatif à la torsion des ressorts à boudin*. Le tréfilé (D), n° 48, p. 137-42, 1 tabl., 5 fig., bibl. (3 réf.) (* Δ), juil. 1964.
- [37] HARINGX (J.A.). – *On highly compressible helical springs and rubber rods and their application for vibration free routing II* (Sur les ressorts hélicoïdaux fortement compressibles et les tiges en caoutchouc et leur application en vibration libre). Philips Research Report (NL), 4, p. 49 (* Δ) (1949).
- [38] MIZUNO (M.). – *Problem of large deflection of coiled springs* (Problème de grande déflexion de ressorts enroulés). Bull. Japan Soc. Mechanical Eng., 3, p. 95 (1960).
- [39] VONDRACEK (H.) et ULBRICHT (J.). – *Messungen an Schrauberdruckfedern zur Ermittlung der Lage des Kraftmittelpunktes in der Aufstandsfläche* (Mesure de ressorts hélicoïdaux de compression pour la détermination de la position du barycentre dans les surfaces d'appui). Automobil Technische Z, 74, n° 1, 1 tabl., 11 fig., bibl. (7 réf.), Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart (1972).
- [40] SPARING (W.H.). – *How much force to deflect a spring sideways ?* (Quelle force pour fléchir un ressort latéralement ?). P. 61-62, dans : CHIRONIS [2].
- [41] CLARK (H.H.). – *Stranded wire helical springs* (Ressorts hélicoïdaux en fil torsadé). P. 92-6 dans : CHIRONIS [2].
- [42] HINKLE (R.T.) et MORSE (I.E.). – *Design of helical springs for minimum values* (Étude de ressorts hélicoïdaux pour les valeurs minimales). P. 15-17 dans CHIRONIS [2].
- [43] HÜBENER (R.). – *Les anneaux élastiques, des pièces rarement citées mais souvent utilisées*. Rev. des Roulements, 189, 12 fig. (+ ○).

On consultera également

- REIMPEL (J.). – *Fahrwerk Technik* (Technique de suspension de véhicule). Tome 2, 300 p., bibl. (20 réf.), Vogel Verlag (* Δ ▲ ○) (1975).
- KREISSIG (E.). – *Die Berechnung des Eisenbahnwagens* (Les calculs des wagons de chemin de fer). Ernst Stauf (*) (1937).
- KREISSIG (E.). – *Theoretisches an dem Wagenbau* (Théorie dans la construction des wagons). Bruno Volger, Leipzig (*).
- PANTHON (M.). – *Revue générale de mécanique*. Sept. 1951.

Normalisation

France

Association Française de Normalisation AFNOR

NF A 35-551	8-84	Aciers de construction non alliés et aciers spéciaux pour cémentation. Nuances. Demi-produits, barres et fils machine.
NF A 35-552	8-84	Aciers de construction non alliés et alliés spéciaux pour traitement thermique. Nuances. Demi-produits, barres et fils machine.
NF A 35-553	4-82	Aciers de construction non alliés et alliés spéciaux pour traitement thermique. Nuances et qualités. Feuillards.
NF A 35-564	12-83	Barres et fils machine en aciers spéciaux pour formage à froid.
NF A 35-571	10-84	Aciers de construction alliés aptes à la fabrication des ressorts formés à chaud.
NF A 45-042	11-83	Plats rainés pour lames de ressorts laminées à chaud. Dimensions et tolérances.
NF A 47-301	3-76	Produits sidérurgiques. Fils ronds en aciers durs non alliés, patentés, tréfilés, pour ressorts.
NF A 47-411	6-83	Ronds étirés à froid en aciers de toutes nuances. Dimensions et tolérances.
NF A 50-736	7-70	Fils tréfilés livrés en couronne. Tolérances sur dimensions et dimensions recommandées.
NF E 25-101	1-77	Ressorts de compression. Indications à fournir au fabricant.
NF E 25-102	1-77	Ressorts de traction. Indications à fournir au fabricant.
NF E 25-103	1-77	Ressorts de torsion. Indications à fournir au fabricant.
NF E 25-104	9-78	Rondelles ressorts coniques. Rondelles dynamiques (dites Belleville).
NF F 01-046	3-70	Ressorts à lames bridés à froid ou à chaud. Ressorts montés. Tolérances.
NF F 01-047	8-74	Ressorts à lames bridés à chaud ou à froid. Lames
NF F 01-048	3-70	Ressorts à lames bridés à chaud ou à froid. Brides. Tolérances. Cotes fonctionnelles.
NF F 01-049	8-74	Ressorts à lames bridés à chaud ou à froid. Cale (type UIC). Clavette. Coins.

Allemagne (République Fédérale d')

DIN Deutsches Institut für Normung eV

177	3-71	Stahldraht, kaltgezogen : Maße, zulässige Abweichungen, Gewichte.
1541	8-75	Fachzeug aus Stahl ; Kaltgewalztes Breitband und Blech aus unlegierten Stählen, Maße, zulässige Maß- und Formabweichungen.
1544	8-75	Fachzeug aus Stahl ; Kaltgewalztes Band aus Stahl ; Maße, zulässige Maß- und Formabweichungen.
1570	2-79	Warmgewalzter gerippter Federstahl ; Maße, Gewichte, zulässige Abweichungen, statische Werte.
1571	1-79	Mittenwarzen für Federblätter.
1573	5-75	Beilagen und Keile für Federbunde, für Schienenfahrzeuge.
1757	6-74	Drähte aus Kupfer und Kupfer-Knetlegierungen, gezogen ; Maße.
1759	6-74	Rechteckstangen aus Kupfer und Kupfer-Knetlegierungen, gezogen, mit scharfen Kanten ; Maße, zulässige Abweichungen, statische Werte.
1777	7-74	Bänder und Bandstreifen aus Kupfer-Knetlegierungen, für Blattfedern kaltgewalzt ; Maße.
1780	6-74	Bänder und Bandstreifen aus Kupfer-Knetlegierungen, für Blattfedern ; Technische Lieferbedingungen.
2076	3-64	Runder Federdraht : Maße, Gewichte, zulässige Abweichungen.
2077	2-79	Federstahl, rund, warmgewalzt ; Maße, zulässige Maß- und Formabweichungen.
2088	7-79	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben ; Berechnung und Konstruktion von Drehfedern (Schenkelfedern).
V 2089	T 1	2-63 Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben ; Berechnung und Konstruktion von Druckfedern.
2090	1-71	Zylindrische Schraubendruckfedern aus Flachstahl ; Berechnung.

2092	6-78	Tellerfedern ; Berechnung.	5542	6-75	Blattfederenden für Schienenfahrzeuge.
2093	4-78	Tellerfedern ; Maße, Werkstoff, Eigenschaften.	17221	12-72	Warmgewalzte Stähle für vergütbare Federn ; Gütevorschriften.
2095	5-73	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten ; Gütevorschriften für kaltgeformte Druckfedern.	17222	8-79	Kaltgewalzte Stahlbänder für Federn ; Technische Lieferbedingungen.
2096	T 1	11-81 Zylindrische Schraubendruckfedern aus runden Drähten und Stäben ; Güteanforderungen bei warmgeformten Druckfedern.	17223	T 1	3-64 Runder Federstahldraht, Gütevorschriften ; Patentiert-gezogener Federdraht aus unlegierten Stählen.
2096	T 2	1-79 Zylindrische Schraubendruckfedern aus runden Stäben ; Güteanforderungen für Großserienfertigung.	V 17225	4-55	Warmfeste Stähle für Federn ; Güteeigenschaften.
2097	5-73	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten ; Gütevorschriften für kaltgeformte Zufedern.	17670	T 1	6-74 Bleche und Bänder aus Kupfer und Kupfer-Knetlegierungen ; Festigkeiteigenschaften.
2098	10-68	Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten ; Baugrößen für kaltgeformte Druckfedern ab 0,5 mm Drahtdurchmesser.	17672	T 1	6-74 Stangen aus Kupfer und Kupfer-Knetlegierungen ; Festigkeiteigenschaften.
2099	T 1	11-73 Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben ; Angaben für Druckfedern, Vordruck.	17677	T 1	6-74 Drähte aus Kupfer und Kupfer-Knetlegierungen ; Festigkeiteigenschaften.
4620	4-54	Federstahl, warmgewalzt, für geschichtete Blattfedern.	17682	T 1	6-74 Runder Federdrähte aus Kupfer-Knetlegierungen ; Festigkeiteigenschaften, Technische Lieferbedingungen.
4621	11-82	Geschichtete Blattfedern ; Federklammern.	43801	T 1	8-76 Elektrische Meßgeräte ; Spiralfedern, Maße.
4626	6-77	Geschichtete Blattfedern ; Federschrauben.	Normalisation internationale		
			EURONORM		
			EU 167		
			3-81	Acier plat laminé à chaud pour ressorts à lames. Dimensions, poids, tolérances, valeurs statiques.	

Organismes

Syndicat National des Fabricants de Ressorts (SNFR).
Centre Technique des Industries Mécaniques (CETIM).
Centre de Documentation de la Mécanique (CDM).
Office Technique pour l'Utilisation de l'Acier (OTUA).
Chambre Syndicale des Producteurs d'Aciers Fins et Spéciaux.