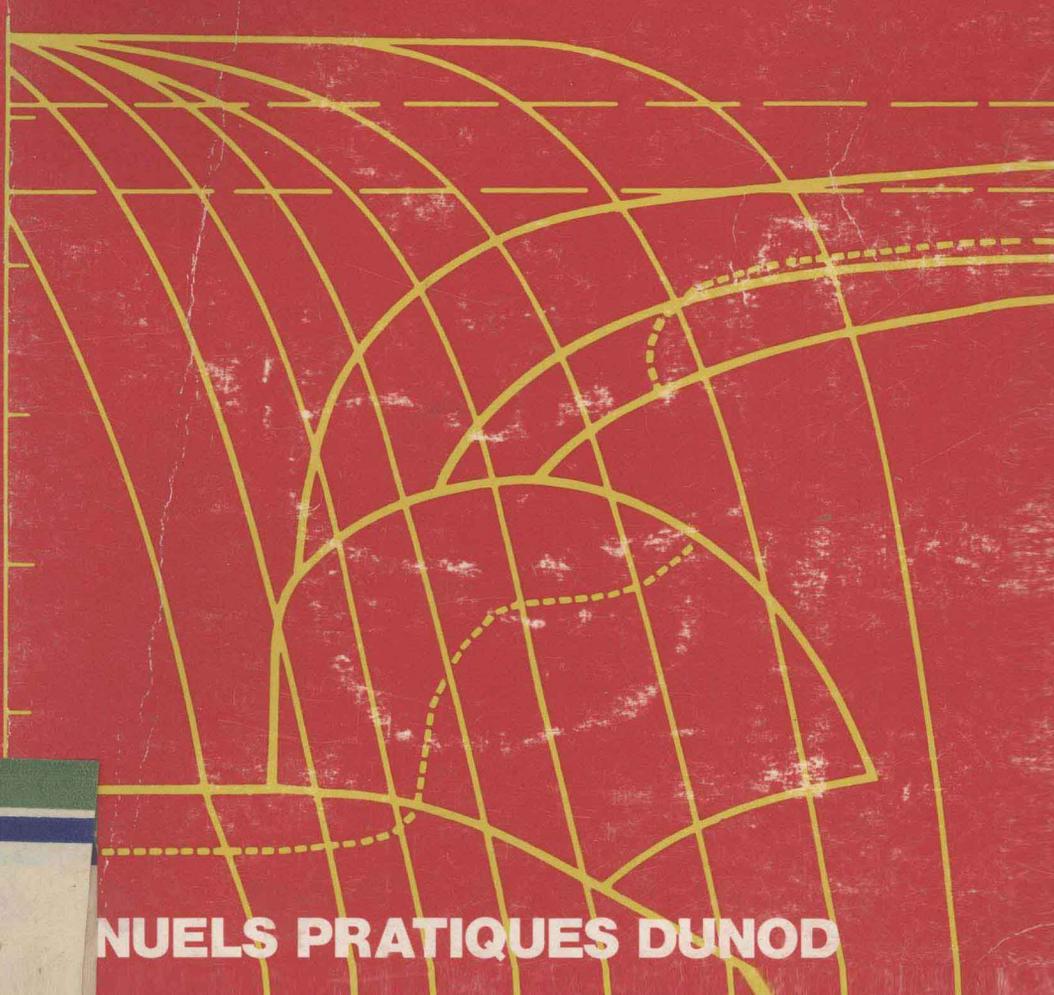


**C. CHAUSSIN**

**MANUEL PRATIQUE  
DES ACIERS  
ET DE LEURS  
TRAITEMENTS  
THERMIQUES**



**MANUELS PRATIQUES DUNOD**

**MANUEL PRATIQUE**  
**DES ACIERS**  
**ET**  
**DE LEURS TRAITEMENTS**  
**THERMIQUES**

PAR

**C. CHAUSSIN**

Agrégé de l'Université

**dunod**

© BORDAS, Paris, 1977 - 011 577 0302

ISBN 2-04-004923-1

“ Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants-droit, ou ayants-cause, est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal. La loi du 11 mars 1957 n'autorise, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, que les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective d'une part, et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration ”

# AVANT-PROPOS

Ce manuel est destiné à tous les techniciens qui, dans leur vie professionnelle, utilisent, travaillent, transforment les aciers.

Il s'agit d'un manuel de base dont la lecture n'exige, au départ, d'autres connaissances que celles normalement acquises durant la scolarité obligatoire. A cet effet, les notions nécessaires à la compréhension du sujet traité sont introduites et expliquées progressivement. Il s'agit d'un manuel pratique qui étudie les problèmes que se posent chaque jour les utilisateurs des aciers et qui présente, en les illustrant d'exemples réels, les principes retenus pour les résoudre. Bien entendu, tous les renseignements nécessaires relatifs au choix des aciers et à la conduite des divers traitements ne peuvent figurer dans ce simple manuel, mais le lecteur trouvera les compléments souhaitables dans les excellents recueils publiés par les organismes professionnels spécialisés (1).

A partir d'expériences caractéristiques, conduisant à des résultats numériques facilement exploitables dans la vie professionnelle, notre souci constant a été de présenter une explication simple et cependant correcte des phénomènes physiques et chimiques étudiés. Notre espoir est d'avoir donné une vue claire des fondements de la métallographie et, par l'étude de l'état métallique (maille, cristal, polycristal), d'avoir contribué à la formation générale de tous ceux à qui nous destinons, en premier lieu, ce manuel, c'est-à-dire à tous ceux qui travaillent seuls, soit qu'ils viennent de quitter les établissements scolaires, soit que leurs activités les obligent à reprendre des études depuis longtemps interrompues, voire même tout à fait nouvelles. Dans cet esprit, nous n'avons pas hésité à fournir des explications très détaillées, à avancer pas à pas, à proposer de nombreux exercices dont les réponses numériques figurent à la fin de l'ouvrage.

Nous avons aussi la conviction que ce manuel peut constituer un bon soutien des cours dispensés dans les centres de formation continue et dans les établissements d'enseignement technique, en vue de préparer certificats d'aptitude professionnelle et brevets professionnels.

---

(1) OTUA, par exemple.

# TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION : IMPORTANCE INDUSTRIELLE DE L'ACIER

PREMIÈRE PARTIE : CONSTITUTION ET CARACTERISTIQUES DES ACIERS RECUITS

CHAPITRE 1 : CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

1.1. Essai de dureté .....	5
1.2. Essai de traction .....	7
1.3. Essai de résilience .....	9
1.4. Signification des caractéristiques mécaniques .....	10
1.5. Note sur les unités mécaniques .....	11
Exercices 1.1. à 1.6. ....	11

CHAPITRE 2 : COMPOSITION CHIMIQUE DES ACIERS

2.1. Définition des aciers .....	13
2.2. Etude d'exemples de composition d'aciers .....	13
2.3. Eléments présents dans les aciers .....	15
2.4. Aciers non alliés et aciers alliés .....	15
2.5. Aciers normalisés .....	16
Exercices 2.1. et 2.2. ....	16

CHAPITRE 3 : DÉSIGNATION CONVENTIONNELLE DES ACIERS

3.1. Désignation conventionnelle française .....	17
3.2. Désignation basée sur les caractéristiques mécaniques .....	17
3.3. Désignation basée sur la composition chimique .....	18
3.4. Désignation étrangère .....	20
Exercices 3.1. à 3.3. ....	20

CHAPITRE 4 : STRUCTURE CRISTALLINE DES ACIERS

4.1. Définition du cristal métallique .....	22
4.2. Structure cristalline des métaux purs .....	23
4.3. Structure cristalline du fer $\alpha$ .....	24
4.4. Structure cristalline du fer $\gamma$ .....	25
4.5. Position des atomes de carbone .....	26
4.6. Position des atomes des autres éléments métalliques .....	27
Exercices 4.1. à 4.12. ....	28

## CHAPITRE 5 : CONSTITUTION DES ACIERS RECUITS

5.1. Constituants des aciers non alliés recuits .....	29
5.2. Constitution des aciers non alliés recuits hypoeutectoïdes.	31
5.3. Structure micrographique des aciers hypoeutectoïdes .....	32
5.4. Caractéristiques mécaniques des aciers hypoeutectoïdes ....	33
5.5. Aciers non alliés hypereutectoïdes .....	34
5.6. Aciers alliés recuits .....	34
Exercices 5.1. à 5.9. ....	35

## CHAPITRE 6 : FORMES COMMERCIALES

6.1. Produits finis .....	37
6.2. Produits plats .....	38
6.3. Produits longs .....	38
6.4. Produits transformés .....	39
Conclusion de la première partie .....	41

## DEUXIÈME PARTIE : TRANSFORMATION DES ACIERS

CHAPITRE 7 : TRANSFORMATIONS SOUS L'ACTION DU MILIEU AMBIANT  
LUTTE CONTRE LA CORROSION

7.1. Définition de la corrosion .....	45
7.2. Mécanisme de la formation de la rouille .....	46
7.3. Causes de la corrosion .....	46
7.4. Passivité. Autoprotection .....	47
7.5. Principes de la lutte contre la corrosion .....	47
7.6. Aciers inoxydables .....	49
7.7. Protection de l'acier par application d'un revêtement .....	50
7.8. Protection par modification de la surface .....	51
Exercice 7.1. ....	52

CHAPITRE 8 : TRANSFORMATIONS, SOUS L'ACTION DE FORCES EXTÉRIEURES  
PLASTICITÉ DE L'ACIER

8.1. Modification de la structure cristalline lors de la déforma- tion des métaux .....	53
8.2. Notion de dislocation .....	55
8.3. Rôle des dislocations dans la déformation plastique d'un cristal .....	56
8.4. Cas d'un polycristal .....	58
8.5. Amélioration de la résistance mécanique des aciers .....	58
Exercices 8.1. à 8.6. ....	60

## CHAPITRE 9 : COURBES DE REFROIDISSEMENT - ANALYSE THERMIQUE

9.1. Expériences préliminaires .....	62
9.2. Définition de l'analyse thermique .....	63
9.3. Refroidissement d'un métal pur à l'état liquide .....	64
9.4. Analyse thermique du fer pur .....	65

9.5. Refroidissement des alliages binaires liquides .....	66
Exercices 9.1. à 9.6. ....	67
<b>CHAPITRE 10 : DIAGRAMMES D'ÉQUILIBRE</b>	
10.1. Notion de diagramme d'équilibre .....	68
10.2. Diagramme cuivre-nickel .....	69
10.3. Diagramme plomb-étain .....	71
Exercices 10.1. à 10.5. ....	73
<b>CHAPITRE 11 : DIAGRAMMES D'ÉQUILIBRE DE SOLIDIFICATION FER-CARBONE</b>	
11.1. Présentation du diagramme à cémentite .....	75
11.2. Description du diagramme .....	75
11.3. Etude théorique de la solidification des alliages fer-carbone .....	76
11.4. Diffusion à l'état solide .....	77
11.5. Solidification réelle des alliages fer-carbone .....	78
11.6. Conséquences de l'insuffisance de la diffusion .....	79
Exercices 11.1. à 11.4. ....	80
<b>CHAPITRE 12 : TRANSFORMATIONS DES ACIERS À L'ÉTAT SOLIDE PAR VARIATION DE TEMPÉRATURE</b>	
12.1. Principe de l'étude expérimentale .....	81
12.2. Points de transformation théoriques des aciers non alliés ..	83
12.3. Transformations des aciers non alliés à l'échauffement ....	85
12.4. Transformations des aciers non alliés au refroidissement lent .....	88
12.5. Points de transformation réels des aciers .....	89
12.6. Réserves sur l'intérêt du diagramme d'équilibre fer-carbone	91
12.7. Diagramme T.R.C. ....	92
12.8. Transformations de l'acier eutectoïde au refroidissement ..	94
12.9. Transformations de l'acier 35 CD 4 au refroidissement ....	96
12.10. Transformations des autres aciers au refroidissement .....	98
Exercices 12.1. à 12.14. ....	100
<b>TROISIÈME PARTIE : TRAITEMENTS THERMIQUES DES ACIERS</b>	
<b>CHAPITRE 13 : NOTIONS PRÉLIMINAIRES</b>	
13.1. Cycle thermique .....	105
13.2. Effets des traitements thermiques .....	106
13.3. Classification des traitements thermiques .....	106
Exercice 13.1. ....	107
<b>CHAPITRE 14 : TREMPÉ</b>	
14.1. Généralités .....	108
14.2. Définition de la trempe martensitique .....	108
14.3. Température de trempe .....	110
14.4. Bains de trempe .....	111

14.5. Influence de la grosseur de la pièce (effet de masse) .....	112
14.6. Trempabilité .....	115
14.7. Diagrammes T.R.C. et trempabilité .....	118
14.8. Conclusion pratique .....	120
14.9. Les défauts de trempe des aciers .....	121
Exercices 14.1. à 14.7. ....	123

## CHAPITRE 15 : REVENU

15.1. Définition et intérêt du revenu .....	125
15.2. Transformations au cours du revenu .....	125
15.3. Evolution des caractéristiques mécaniques au cours du revenu	126
15.4. Revenu de détente .....	127

## CHAPITRE 16 : RECUITS

16.1. Définition .....	128
16.2. Recuit d'homogénéisation .....	129
16.3. Recuit de régénération .....	129
16.4. Recuit d'adoucissement .....	130
16.5. Recuit de recristallisation .....	131
16.6. Recuit de relaxation .....	133
16.7. Le recuit au point de vue industriel .....	133

## CHAPITRE 17 : TRAITEMENTS THERMIQUES ISOTHERMES

17.1. Diagrammes T.T.T. ....	135
17.2. Trempe étagée martensitique .....	137
17.3. Trempe étagée bainitique .....	138
17.4. Recuit isotherme .....	138
Exercices 17.1. à 17.5. ....	139

## CHAPITRE 18 : FOURS DE TRAITEMENTS THERMIQUES

18.1. Grande variété des types de fours .....	140
18.2. Mode de chauffage .....	140
18.3. Atmosphères contrôlées .....	142
18.4. Notions sur les fours intermittents .....	143
18.5. Notions sur les fours continus .....	144
18.6. Fours à bain de sels .....	145
Exercices 18.1. à 18.3. ....	146

## CHAPITRE 19 : TRAITEMENTS SUPERFICIELS

19.1. But des traitements superficiels .....	147
19.2. Trempe superficielle .....	148
19.3. Cémentation .....	149
19.4. Carbonituration .....	150
19.5. Autres procédés .....	150
Exercice 19.1. ....	151

## QUATRIÈME PARTIE : SIDERURGIE ET CHOIX DE LA NUANCE D'ACIER

## CHAPITRE 20 : ELABORATION DE L'ACIER

20.1. Minerai de fer .....	155
20.2. Fabrication de la fonte .....	156
20.3. Principe de la fabrication de l'acier .....	157
20.4. Les divers procédés de fabrication de l'acier .....	158
Exercices 20.1. à 20.4. ....	160

## CHAPITRE 21 : CHOIX DE LA NUANCE D'ACIER

21.1. Le problème du choix de la nuance d'acier .....	161
21.2. Tableaux synoptiques relatifs aux aciers de construction mécanique .....	162
21.3. Exemple de choix d'acier .....	163
Exercice 21.1. ....	164

## RÉPONSES NUMÉRIQUES AUX EXERCICES

# INTRODUCTION

## IMPORTANCE INDUSTRIELLE DE L'ACIER

L'acier est, de loin, le métal le plus utilisé, puisque la production mondiale d'acier est environ 20 fois plus élevée que celle de l'ensemble des autres métaux.

La production mondiale de l'acier a été d'environ 710 millions de tonnes pour l'année 1974, dont 27 pour la France (3,8 %).

La consommation annuelle d'acier par habitant pour les principaux pays industriels est la suivante (année 1974) :

Japon .....	735 kg	France .....	492 kg
Etats-Unis .....	670 kg	Italie .....	458 kg
RFA .....	660 kg	Royaume-Uni .....	453 kg
URSS .....	522 kg		

Ce grand succès de l'acier tient à quatre causes essentielles

1° *Prix de revient peu élevé* - Grâce à l'abondance de minerais de fer de haute teneur et à la facilité de l'extraction du métal par des procédés relativement bon marché, l'acier est le métal le moins cher.

Le tableau suivant précise cette idée en donnant le prix du kilogramme de métal ; il s'agit de *prix de gros*, le métal étant livré en lingots avant toute transformation en vue de lui donner une forme déterminée.

Acier (1) .....	1,2 F/kg	Cuivre .....	5,4 F/kg
Plomb .....	1,6 F/kg	Magnésium .....	9,5 F/kg
Zinc .....	3,7 F/kg	Nickel .....	22 F/kg
Aluminium .....	4,1 F/kg	Etain .....	30 F/kg

2° *Facilité de mise en oeuvre* par des procédés variés : usinage,

(1) Il s'agit de l'acier courant. Les divers aciers ont des prix très variables selon la forme commerciale du produit et, surtout, en fonction de la teneur en éléments alliés ; ainsi, le prix de l'acier 35 CD 4 (chap. 2.2) est de 2,5 F/Kg

forgeage, formage à froid, extrusion (1), soudage...

3° *Excellentes propriétés mécaniques* - Toutes les pièces métalliques destinées à supporter des efforts importants (exemple : câbles de téléphériques) sont en acier, parce que, à section égale, les tiges en acier sont plus résistantes que celles fabriquées en tout autre métal usuel.

4° *Facilité d'obtenir des propriétés variées* :

- d'une part, en agissant sur la composition chimique de l'acier (lors de l'élaboration à l'aciérie), ce qui permet d'obtenir un grand nombre de *nuances* ;

- d'autre part, en réalisant des traitements variés (traitements mécaniques, traitements thermiques dans la masse, traitements thermo-chimiques dits superficiels), qui permettent de transformer, parfois profondément, les caractéristiques d'un acier de composition chimique donnée.

---

(1) Procédé par lequel un métal est poussé à chaud par une presse dans une filière de profil convenable.

**PREMIÈRE PARTIE**  
**CONSTITUTION ET CARACTÉRISTIQUES**  
**DES ACIERS RECUITS**



# CHAPITRE 1

## CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

On sait que l'acier est utilisé à cause de ses bonnes propriétés mécaniques. La qualité que l'on recherche d'un acier est quelque chose d'extrêmement complexe et qui dépend de l'emploi auquel il est destiné. On conçoit qu'il a été nécessaire d'établir des bases d'appréciation des qualités de l'acier afin d'éviter toute équivoque entre acheteur et vendeur d'acier. Les essais que l'on a mis au point conduisent à définir ce que l'on appelle les *caractéristiques mécaniques*.

Dans ce chapitre, nous ne traiterons que des essais les plus courants ; nous nous attacherons à préciser la signification des caractéristiques mécaniques qui leur correspondent sans donner de détails sur les appareils, ni sur leur mode d'emploi.

### 1.1. ESSAI DE DURETÉ.

L'essai de dureté consiste généralement à exercer une charge déterminée sur un corps très dur (appelé *pénétrateur*) placé sur le métal à étudier ; plus celui-ci est dur et moins le pénétrateur s'enfonce.

Trois méthodes sont les plus répandues ; elles diffèrent essentiellement par la forme du pénétrateur (fig. 1.1.) et par la définition de la dureté.

L'essai *Brinell* utilise une *bille* en acier de 10 mm de diamètre avec une charge  $F$  de 3 000 kilogrammes-force (1). Après cessation de l'application de la charge et enlèvement de la bille, on mesure le diamètre de l'empreinte. On calcule l'aire  $S$  de cette empreinte (en  $\text{mm}^2$ ) et, par définition, la dureté Brinell (symbole HB) est le quotient de la charge  $F$  (3 000) par l'aire de l'empreinte :

$$\text{HB} = \frac{3\,000}{S \text{ (mm}^2\text{)}}$$

---

(1) Le kilogramme-force est une unité périmée qui vaut 9,8 newtons (chap. 1.5.).

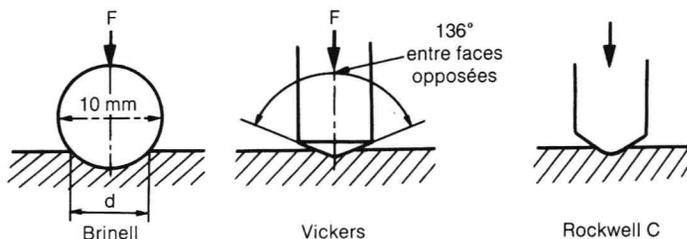


Fig. 1.1

L'essai *Vickers* utilise comme pénétrateur une *pyramide* à base carrée. La dureté Vickers (symbole HV) se définit comme la dureté Brinell, S désignant l'aire de l'empreinte.

L'essai *Rockwell* utilise généralement un *cône* de diamant à pointe arrondie, et l'appareil mesure les différences de profondeur de pénétration causées par deux charges différentes, une grande et une petite (symbole HRC). La définition de la dureté Rockwell est complexe, et nous ne la donnerons pas. Signalons que l'essai Rockwell présente plusieurs variantes, la charge maximale ayant plusieurs valeurs possibles et le pénétrateur pouvant être une *bille* ; le symbole est alors HRB ; la bille a un diamètre de 1,5875 mm.

Les nombres qui expriment la dureté d'un même acier selon ces diverses méthodes sont évidemment différents ; il existe des tableaux de correspondance qui permettent de déterminer approximativement les diverses duretés à partir de l'une d'entre elles.

*Exemples* - Pour un certain acier de faible dureté, les diverses duretés sont :

110 HB                      110 HV                      63,4 HRB

Pour un certain acier de grande dureté, les diverses duretés sont :

700 HV                      59,3 HRC

(la dureté Brinell n'est pas donnée, car l'essai correspondant est limité à une dureté de 430 HB).

Les essais de dureté présentent deux gros avantages sur les essais décrits ci-après : ils sont très rapides et ils s'effectuent sans destruction de la pièce essayée.

## 1.2. ESSAI DE TRACTION.

Elasticité et plasticité. Quand on agit latéralement sur l'extrémité d'un fil d'acier dur disposé verticalement dont l'autre extrémité est serrée dans un étau, on déforme ce fil, mais si l'on cesse l'action, le fil reprend sa position primitive : on dit que la déformation était *élastique*. Si l'on augmente suffisamment l'effort de déformation, on constate que le fil ne reprend plus sa position primitive après cessation de l'effort ; il a subi une déformation permanente dite encore *plastique*.

Les propriétés mécaniques usuelles des métaux font intervenir leur élasticité et leur plasticité. L'*élasticité* est la faculté que possède le métal de pouvoir subir une déformation qui cesse après la suppression de l'effort qui l'a provoquée ; ainsi, les divers organes des machines font appel à l'élasticité du métal. La *plasticité* est la faculté de subir une déformation permanente sans que rupture s'ensuive ; cette propriété est utilisée dans les transformations subies par l'acier lors de sa mise en forme, par forgeage, laminage, emboutissage, tréfilage ; elle revêt deux aspects principaux : malléabilité (possibilité de réduire le métal en feuilles plus ou moins minces) et ductilité (faculté de pouvoir l'étirer en fils).

Etude sommaire de l'essai de traction. On utilise une éprouvette de forme et de dimensions bien déterminées, constituée généralement par une partie cylindrique calibrée raccordée à deux têtes de plus grand diamètre (fig. 1.2.). Sur la partie cylindrique, on trace deux repères définissant une longueur  $L_0$  dite longueur entre repères. On adopte de préférence les dimensions suivantes :

$L_0$  : 50 mm ;  $L_c$  (longueur de la partie calibrée) : 55 à 70 mm ;  $d$  (diamètre de la section) : 10 mm.

Cette éprouvette est montée sur une machine convenable qui permet d'exercer un effort de traction dans le sens de l'axe de l'éprouvette ; il en résulte un allongement  $\Delta L$  de la longueur entre repères.

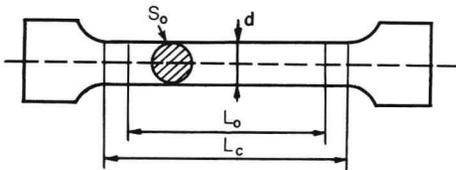


Fig. 1.2

Soit  $F$  l'effort de traction ; si  $S_0$  désigne la section initiale de l'éprouvette dans la partie calibrée,  $F/S_0$  est la charge par unité de section ; elle s'exprime en  $N/mm^2$  (newton par millimètre carré) (1).

$\frac{\Delta L}{L_0}$  est l'allongement relatif, et  $A = 100 \frac{\Delta L}{L_0}$  est l'allongement relatif pour cent.

(1) Cette unité est aussi appelée mégapascal (symbole MPa).

L'essai de traction est généralement fait à l'aide d'une machine qui trace la courbe de traction.

**Courbe de traction.** Pour la plupart des aciers, la courbe de traction a qualitativement l'allure représentée par la figure 1.3. ; elle comporte en ordonnées le quotient  $F/S_0$  et en abscisses l'allongement relatif pour cent  $A$ . On y distingue trois parties qui ne sont pas toujours aussi nettement distinctes que dans le cas de la figure 1.3.

a) *Partie OE.* - Cette partie est sensiblement rectiligne, et elle correspond à la *déformation élastique* de l'acier ; si on diminue lentement l'effort de traction quand le point représentatif est sur OE, ce point va décrire la courbe initiale en sens inverse et revient en 0 pour une charge nulle.

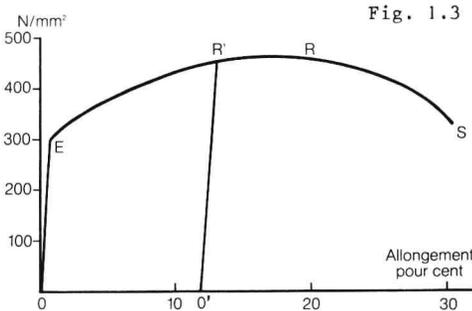


Fig. 1.3

b) *Partie ER.* - Au-delà de E, on est en présence d'un arc de courbe croissant ; la charge croît beaucoup moins vite avec l'allongement que précédemment et atteint une valeur maximale en R. En même temps, la section de l'éprouvette diminue.

A partir du point E, le métal a pénétré dans la zone de plasticité ; il est dit *écroui*. Si on laisse diminuer progressivement l'effort de traction quand le point figuratif est sur ER, en R' par exemple, ce point décrit sensiblement une droite R'O' parallèle à OE, et quand la charge redevient nulle, l'éprouvette conserve un *allongement permanent* correspondant à OO'.

c) *Partie RS.* - Il s'agit d'un arc de courbe décroissant. Quand la charge atteint sa valeur maximale, un étranglement se produit sur l'éprouvette, puis il s'accroît, l'effort de traction diminue et l'éprouvette s'allonge dans la partie étranglée ; enfin, l'éprouvette se rompt brusquement (point S) sous une charge inférieure à la charge maximale.

### Caractéristiques déduites de l'essai de traction.

L'essai de traction donne les trois caractéristiques suivantes :

a) Résistance à la traction R. Cette caractéristique correspond au point R de la courbe de traction. C'est le quotient de la charge maximale que le métal peut supporter sans se rompre, par la section initiale de l'éprouvette. Elle s'exprime en  $N/mm^2$ . Dire qu'un certain acier a une résistance à la traction de  $500 N/mm^2$  signifie que pour rompre un fil de  $1 mm^2$  de section (c'est-à-dire de  $1,1 mm$  de diamètre si le fil est cylindrique), il faut exercer une force de traction suivant l'axe du fil égale à  $500 N$ .