



Faculté des Sciences de L'Ingéniorat

Département : Génie Mécanique

**MEMOIRE**

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de **Master II**

**Durcissement d'écrouissage et par  
affinement des grains**

Domaine : Science et Technique

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Mécanique des matériaux

**Présenté par** : ANTAR BERBITI

**DIRECTEUR DU MEMOIRE** : Pr. HAMADACHE Hamid

**DEVANT LE JURY**

**PRESIDENT** : Pr. MERABTINE .A

**EXAMINATEURS** : Pr. MNAIL .Y

**EXAMINATEURS** : Mm. Z. ZEMOURI

**Année : 2016/2017**

## REMERCIEMENTS

*Je tiens à remercier particulièrement Dr **H.Hamadache** pour avoir eu, le long de ce parcours, la patience d'assurer mon encadrement et de m'avoir dans l'élaboration de ce mémoire.*

*Mes remerciements vont aussi au Président du jury Mr ....., professeur à l'Université Badji Mokhtar de Annaba, pour avoir accepté de présider le jury de soutenance de ma thèse et aux membres du Jury,.*

*Pour avoir accepté d'examiner ce travail et diriger la soutenance.*

## **REMERCIEMENTS**

Je remercie tout d'abord << ALLAH >> qui m'a donné la force et la patience nécessaire pour réaliser ce modeste travail.

Je remercie mon encadreur Pr : HAMADACHE. H

Je remercie aussi << TOUFIK BELAHRECH>> POUR SON SUPPORT ET SA PATIENCE.

Je remercie également tous les ENSEIGNANTS DU DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE, ET toute l'équipe de L'entreprise << ALFAPIPE>> mes collègues ainsi que mes amis.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont aidé a réaliser ce travail.

# SOMMAIRE

## Chapitre I : Etude des courbes conventionnelles de traction

1. Essai de traction.....	1
<b>1.1.2 Le durcissement par écrouissage.....</b>	<b>1</b>
1.1 Intérêt et déroulement de l'essai .....	1
1.2 Courbes conventionnelle et rationnelle de traction.....	2
1.3. Propriétés de traction.....	3
1.3.1 Domaine élastique linéaire .....	4
1.4. Domaine plastique.....	6
i) Déformation plastique homogène.....	6
ii) Déformation plastique hétérogène .....	6
1.5. Essais dureté .....	7
1.5.1. Domaines de la dureté.....	7
1.5.2. Essais sclérométriques ou par rayures .....	9
1.5.3 Les essais par rebondissement .....	9
1.5.4. Les essais par indentation.....	10
1.5.4.1 Essai de dureté Brinell .....	10
1.5.4.2. Essai de dureté Rockwell .....	11
1.5.4.3. L'essai de dureté Vickers .....	12
1.6. Phénomène d'écrouissage .....	14
1.6.1. Mécanisme et effet de l'écrouissage.....	14
1.6.2. Influence de l'écrouissage sur les caractéristiques mécaniques.....	14
1.6.3. Courbe et coefficient d'écrouissage.....	15
1.6.4 Modélisation des courbes conventionnelles.....	17
1.6.4.1 Contrainte et déformation vraie.....	17
1.6.4.2 Obtention de la courbe rationnelle.....	18

## Chapitre II : traitement thermique

Introduction.....	22
II- La Trempe.....	22
II-1- Trempe de masse.....	22
II-1-1- 1But.....	22
II-1-1-2- Principe.....	22
a- Chauffage.....	22
b- Maintien à température d'austénisation. Dépend.....	22
c- Refroidissement (air, eau ou huile).....	23
d- <i>Fluide de trempe</i> .....	23
II-1-2- Trempe superficielle ou localisée .....	23
1-2-1- But :.....	23
1-2-2- Principe.....	23
1-2-3- Matériaux utilisés.....	23
II-2 Le REVENU.....	23
II-2.1 Principe et But de Revenu.....	23
II-2. 2 DIFFERENTS TYPES DE REVENU.....	24
II-2.2.1. Revenu de relaxation ou de détente .....	24
II-2.2.2 Revenu de structure ou classique .....	24
II-2.2.3. Revenu de durcissement .....	24
II-2.3. EVOLUTION DES PROPRIETES AU COURS DE REVENU .....	24
II 2. 3.1. Influence de la composition chimique de l'acier.....	25
II 2.3.2. Influence de la température et du temps de revenu.....	25
II 2. 4-Comportement des caractéristiques mécaniques après traitement thermiques.....	26
II 2-5-EN résumée :.....	27
II 3- Le Recuit .....	28
II 3 -1- But :.....	28
II 3-2- Principe :.....	29
II-3-3- Différents types de recuit .....	30
A -Le recuit d'adoucissement.....	31
B- Recuit dnormalisation.....	32
C) Le recuit de détente.....	33
C-1- Recuit de régénération .....	34

C-2- Recuit de recristallisation.....	34
D) Recuit d'homogénéisation ou de diffusion .....	34

### Chapitre III :les traitements mécaniques de surfaces

II.1. Introduction.....	36
II.2. Définition et principe.....	36
II.3. Intérêt et Paramètres du brunissage.....	38
II.4. Effets du brunissage.....	39
II.4.1. Effets sur la qualité géométrique de surface.....	39
II.4.2. Effets sur la qualité physique de surface.....	40
II.4.3. Effets sur la qualité mécanique de surface.....	44
II.5. Conclusion.....	46

### Chapitre IV :Matériaux et techniques expérimentales

IV.1. Identification du matériau.....	49
IV.2. Caractéristiques mécaniques .....	49
IV.3. Microstructure .....	49
IV.4 Etude métallographique .....	50
IV.4.1. Préparation des échantillons.....	50
IV.5. Essai de dureté .....	52
IV.6. Traitement thermique .....	52

### Chapitre V :Résultats

V .1 – COURBE CONVENTIONNELLE DE TRACTION.....	58
V .2 – COURBE RATIONNELLE DE TRACTION.....	59
V.3- MESURE DE DURETE.....	59
V.4- EVALUATIONS DU COEFFICIENT D' ECROUISSAGE.....	61

## REFERENCES :

- [1] Afnor, Produits sidérurgique, Aciers pour construction, Recueil de normes françaises, 1988.
- [2] H. Hamadache ; Concepts Fondamentaux de la Mécanique Des Matériaux, éditions dde l'université de Badji Mokhtar, 2007.
- [3] J. Mandel, propriétés mécanique des matériaux, Editions Eyrolles, 1978.
- [4] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques ,2007.
- [5] O.CV.A Brsanti, voyage au cœur de l'acier.
- [6] H. Hamadache, Influence du galetage sur la tenue en fatigue d'un alliage Al2024, Thèse de doctorat, Université de Annaba, 2007.
- [7] E. Callisterwd, Propriétés Mécaniques Des Matériaux, Science Et Génie Des Matériaux
- [8] A. RASKIN, Rappels atomistiques, structure des métaux, des alliages et des céramiques, Université Médicale Virtuelle Francophone,2010.
- [9] S. Naamane, Etude De La Déformation Plastique De La Ferrite A Basse Température ; Simulations De Dynamique Des Dislocations Universite Pierre Et Marie Curie,Soutenance 2008.
- [10] Rupture et plasticité, Département de Mécanique, Ecole Polytechnique, 2010.
- [11] D. François, Lois de comportement des métaux : Élastoplasticité ; Viscoplasticité, École Centrale de Paris.2012.
- [12] F. yahamdi, modélisation des courbes de tractions et évaluation du coefficient d'écrouissage des aciers traitée par brunissage, Université Badji Mokhtar Annaba; 2008.
- [13] Dominique FRANÇOIS, Essais de rupture, technique de l'ingénieur, 2012.
- [14] M. Lemaître, J. Chaboche, Mécanique des matériaux solides, Editions Dunod, Paris 1985.
- [15] L. Kheloufi, Adhésifs et technique de collage caractérisation de 'adhérence, Thèse de Magister
- [16]. A. Madi, conférence scientifique, Université Annaba, Mars 2011.
- [17] A. Zeghloul, Procédés Concepts Fondamentaux De La Mécanique De La Rupture, DEA Mécanique-Matériaux-Structures, Metz, 2004.
- [18] O. Barrau, Etude du frottement et de l'usure D'acier à outils de travail à chaud, thèse doctorat, 2004.
- [19] V.S. Parfianovitch ; les instructions sur la projection des du traitement de finition par repassage des surfaces MINSIA POLIMA, 1983, pp 78.  
112
- [20] H. E.F groupe guide d'empli des traitements de surfaces appliquées aux problèmes de frottements tec et doc (2000).
- [21] H. LEGRAIN, Etude de l'influence de la rugosité Sur l'écoulement de fluide dans les Fissures rocheuses. Thèse doctorat, 2006.

[22] Mécanique de la rupture les essais et leurs significations, Ecole des mines, Nancy, Éditions 1988.

[23] H. Bückle la machine outil française, 206,125-147,1965.

[24] F.MOHS, English translation by Haidinger, W., 1825, Treatise on Mineralogy (Edinburgh: Constable), 1 824.

[25] A. Iost, R. Bigot, L. Boudreau, matériaux et techniques, l'essai de dureté Vickers : applications et influence de la charge.77-79, 1995.

[26] [Http://Fr.Wikipedia.Org/wiki/Duret%C3%A9\\_mat%C3%A9rielle](http://fr.wikipedia.org/wiki/Duret%C3%A9_mat%C3%A9rielle) 029, Catégories: Science des matériaux • Métallurgie • Essai mécanique.

[27] M. GRUMBACH et al, Mitaux, Corrosion, Industrie, 58, 690, 69-74,1983.

[28] M. GRUMBACH

**1-TaâmallahOuahiba**[ Effet des traitements mécaniques de surface

(TMS) sur l'écrouissage et la ténacité d'un acier]. MEMOIRE de MAGISTERUNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA. 2012.

-2-**Mr. Amari Idriss**[*Influence des traitements thermiques sur la structure et les propriétés de l'acier Hadfield*] ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES ET METALLURGIE ENSMM-Annaba.2016.

3- ETUDE Exépérimentale sur les essais mecaniques.

# LISTE DES FIGURES

<b>Figure I.</b> Eprouvette de traction : a) cylindrique, b) prismatique.....	2
<b>Figure I.</b> Courbes rationnelles de traction de l'acier 35NC6( <i>ep 7et 8</i> ).....	3
<b>Figure I.29.</b> Représentation d'une courbe de traction (matériau ductile.....	4
<b>Figure I.</b> Détermination de la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % ( $Re_{0,2}$ ) d'un alliage d'aluminium.....	5
<b>Figure I.</b> Courbe de traction d'un acier doux ( $Fe-0,15\%C$ ) présentant une discontinuité à la limite d'élasticité.....	6
<b>Figure I..</b> Définitions des différents domaines de dureté.....	8
<b>Figure I.</b> Schématisation de l'essai de glissement- rayure ( <i>pointe conique</i> ).....	9
<b>Figure</b> Principe de dureté brinell.....	11
<b>Figure I.</b> Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle <i>HRC</i> , b) échelle <i>HRB</i> .....	12
<b>Figure I.25.</b> Principe de dureté Vickers.....	13
<b>Figure I.32.</b> Variations des caractéristiques mécaniques en fonction de l'érouissage d'un fil d'acier à 0,06 % C.....	15
<b>Figure.</b> Phénomène d'érouissage sur une courbe rationnelle de traction.....	16.
<b>Figure. I.34.</b> Courbe rationnelle de traction en coordonnées logarithmiques.....	17
<b>Figure v 1 .</b> Courbe rationnelle de traction .....	19
<b>Figure v 2.</b> évaluation de point de rupture.....	19
<b>Figure V.3.</b> Paramètres géométrique de la zone de striction ; a) microscope optique de mesure, b) principe de mesure.....	20
<b>Figure :v I.I</b> CYCLE COMPLET ( TREMPE . REVENU).....	24
<b>Figure II.2 :</b> Influence de la teneur en éléments d'alliages sur la dureté des aciers à 0.35%C avec la température de revenu.....	25
<b>Figure II.3 :</b> Variation de la dureté en fonction du temps de maintien pour quatre températures de revenu de l'acier à 0.8%C.....	25

<b>Figure II 4 :</b> Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu de l'acier 25CrMo4.....	<b>26</b>
<b>Figure II.5 :</b> Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu de quelques métaux.....	<b>27</b>
<b>FIGURE III . PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE BRUNISSAGE.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure112.</b> outil du brinissage commercialise par la firmeCOGSDILL TOOL.....	<b>37</b>
<b>Figure III3.</b> Defferents surface a traiter par brunissage.....	<b>38</b>
<b>Figure III.4.</b> Lissage du profil de surface par brunissage d'acier .....	<b>39.</b>
<b>Figure III.5.</b> Effet du brunissage sur la rugosité de surface.....	<b>40</b>
<b>Figure III.6.</b> Influence de la vitesse de brunissage sur la dureté de l'acier RB40.....	<b>41</b>
<b>Figure III.7.</b> Influence de l'avance de brunissage sur la dureté de l'acier brunissage .....	<b>41</b>
<b>Figure III.8.</b> Influence de l'effort de brunissage sur la dureté.....	<b>42</b>
<b>Figure III.9.</b> Influence de rayon de l'outil sur la dureté .....	<b>43</b>
<b>Figure III.10.</b> Influence de nombre de passe de brunissage sur la dureté (l'alliage d'aluminium 6061-T6.....	<b>43</b>
<b>Figure III.11.</b> Contraintes résiduelles obtenues sur une pièce forgée à froid: a) état de brunissage, b) état de tournage, c) état de grenailage .....	<b>44</b>
<b>Figure III.12.</b> Evolution des contraintes résiduelles avec la vitesse sur pièces en 6061-T6 traitée par brunissage : a) en fonction du nombre de passe, b) en fonction de la profondeur de pénétration.....	<b>45.</b>
<b>Figure III.13</b> Courbe de Wöhler d'alliage de magnésium AZ80 Pour différent traitements [74]: EP= electrolytical polishing, RB=Roller burnishing, SP=Shot peening.....	<b>46</b>
<b>Figure IV.5</b> .Illustration d'une opération de trempe à l'huile.....	<b>49</b>
<b>FIGURE.V. 1 :</b> Courbe conventionnelle de traction (Epr. 8 usinage).....	<b>53</b>
<b>FIGURE.V. 2 :</b> Courbe de traction conventionnelle (Epr.7 brunissage.....	<b>53</b>
<b>FIGURE .V.3</b> Courbe rationnelle de traction (ép. 7 brunissage).....	<b>54</b>
<b>FIGURE.V. 4 :</b> Courbe rationnelle de traction (ep8 usinage).....	<b>55</b>

<b>FIGURE .V.5</b> : Courbe d'écrouissage (ép. 7 brunissage).....	56.
<b>FIGURE V.6</b> : Courbe d'écrouissage (ép. 8 usinage.....)	<b>56</b>
<b>FIGURE V.7</b> : Diagramme $n=f(\sigma)$ ( ep7).....	57
<b>Figure V.9.</b> Coefficient d'écrouissage de l'acier 35NC6 : éprouvette 7 traités mécaniquement par brunissage. a) zone 1, b) zone 2, c) zone 3	
<b>FIGUREV.8:</b> $n=f(\sigma)$ (ep8).....	58
<b>Figure V.9.</b> Coefficient d'écrouissage de l'acier 35NC6 : éprouvette 7 traités mécaniquement par brunissage. a) zone 1, b) zone 2, c) zone 3.....	59
<b>Figure V.6.</b> Coefficient d'écrouissage de l'acier 35NC6 : éprouvette 8 usiné. a) zone 1, b) zone 2, c) zone 3.....	61

## 1. Essai de traction :

### 1.1 Intérêt et déroulement de l'essai :

L'essai de traction est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à deux efforts  $F$  de tension de sens opposés et de même valeurs absolues. La ligne d'action étant confondue avec l'axe de symétrie ou de rotation de l'éprouvette. On mesure instantanément l'allongement  $\Delta l$  correspondant.

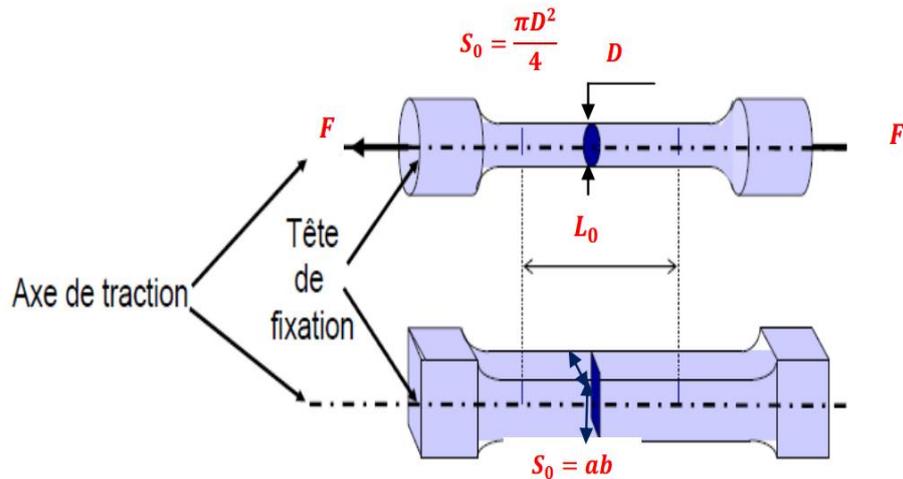
Afin de pouvoir utiliser les courbes brutes de traction, on doit les modifier pour que les résultats obtenus ne soient fonction que du matériau étudié et non de la géométrie de l'éprouvette. Pour ce faire, on rapporte la charge à la section initiale  $S_0$  de l'éprouvette en vue d'obtenir la contrainte nominale  $\sigma$ .

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Et on rapporte l'allongement  $\Delta l$  à la longueur initiale entre repères  $l_0$ , pour obtenir la déformation nominale  $\varepsilon$ .

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

L'essai est le plus souvent normalisé. La forme de l'éprouvette est soit cylindrique, soit prismatique



**Figure I.** Epreuve de traction : a) cylindrique, b) prismatique.

Les extrémités, ou têtes, de l'éprouvette ont une section supérieure à  $S_0$  ce qui permet de les fixer sur la machine d'essai. La géométrie des têtes dépend du mode de fixation utilisé (*serrage sur têtes lisses, filetage ou épaulement*). Le raccordement entre la partie centrale et les têtes doit toujours être progressif afin de minimiser l'effet de concentration des contraintes. L'éprouvette comprend toujours, entre deux repères séparés par une distance  $l_0$ , une section constante  $S_0$ . Comme la charge de traction est appliquée selon l'axe de l'éprouvette, on comprend que dans la zone centrale, entre les repères, la contrainte soit uniforme tant que la section demeure constante.

## 1.1.2 Le durcissement par écrouissage :

Une déformation plastique préalable effectuée à froid multiplie les dislocations dans le matériau. Dans ce réseau plus dense, les dislocations mises en mouvement par la contrainte de service appliquée ont un mouvement plus difficile car elles interagissent avec le champ de contrainte des dislocations initialement créées dans le matériau. On parle prosaïquement d'interaction avec les « arbres de la forêt ». Il est aisé de comprendre ce mécanisme en examinant simplement une courbe de traction . Au cours de la sollicitation mécanique initiale, si la limite élastique conventionnelle est dépassée et que l'on relaxe la contrainte, alors le matériau présente un allongement relatif permanent ( $\epsilon_p$ ). Lors d'une sollicitation mécanique ultérieure, la caractéristique contrainte-allongement suit la droite ( $OC$ ), rejoint la courbe initiale en  $M$  qui définit une nouvelle limite d'élasticité, supérieure à Principe du durcissement par écrouissage.

## 1.2 Courbes conventionnelle et rationnelle de traction :

L'essai de traction nous permet d'obtenir la réponse du matériau sous forme d'une courbe dite courbe de traction du matériau.

Dans le cas général, les machines d'essai fournissent une courbe dite conventionnelle puisqu'on l'on rapporte les efforts  $F$  à la valeur initiale  $S_0$  de la section. Cela peut être accepté dans le domaine des petites déformations ( $\epsilon \leq 20\%$ ). Cependant lorsque les déformations deviennent importantes ( $\epsilon \rightarrow \infty$ ), la réduction de la section le devient aussi à cause de l'instabilité plastique à tel point que la contrainte réelle ou vraie  $\sigma$  soit représentée par le rapport de la force à la section instantanée  $S$ . Une courbe rationnelle de traction est donc la représentation graphique de la contrainte vraie  $\sigma$  en fonction de la déformation relative  $\epsilon_r$ .

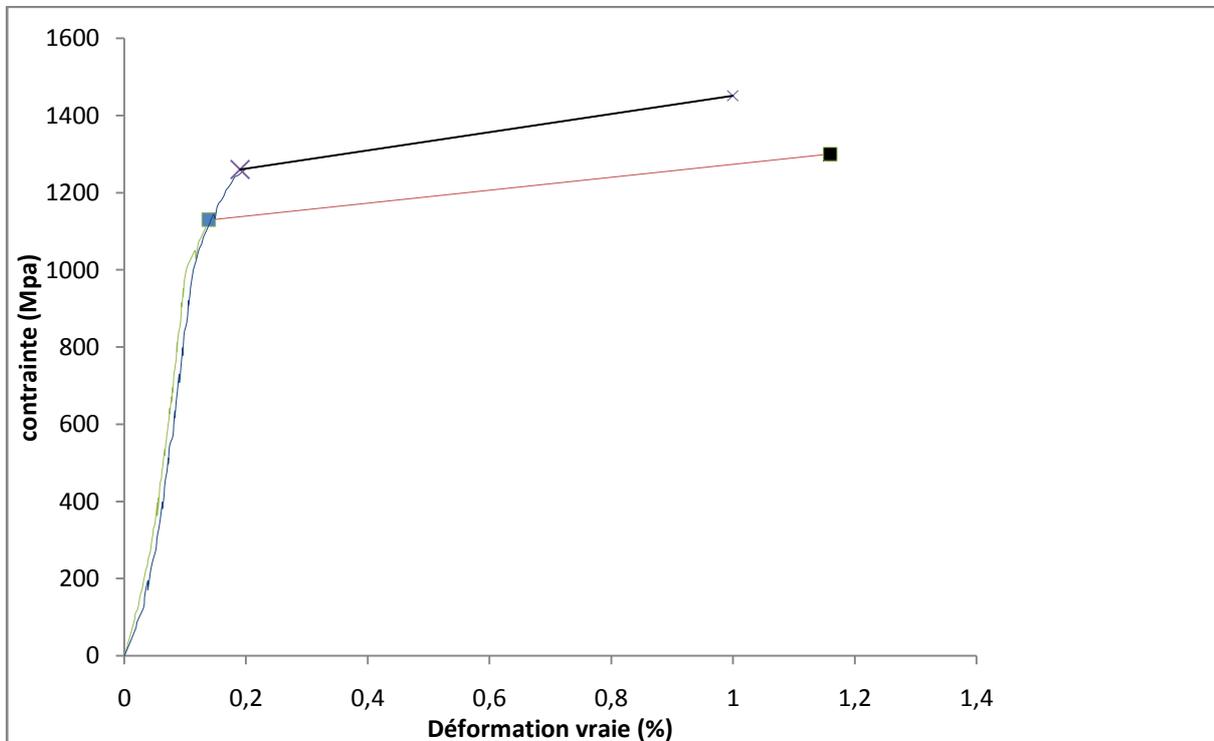


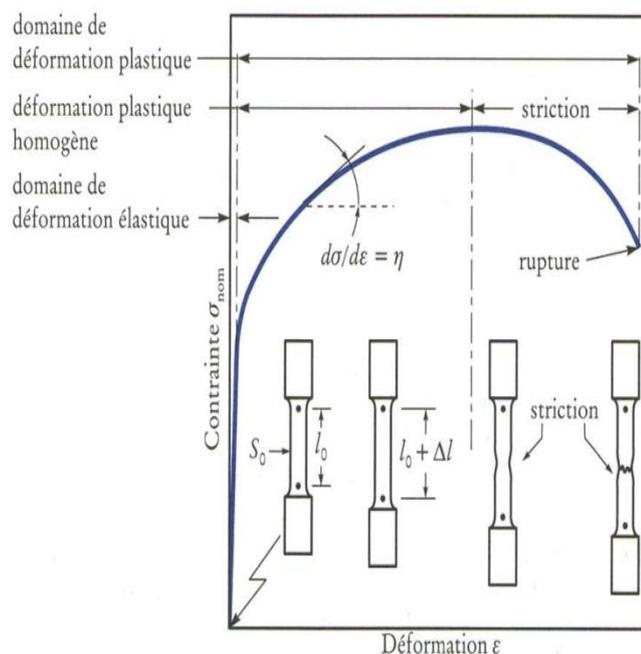
Figure I. Courbes rationnelles de traction de l'acier 35NC6 (ep 7 et 8)

# CHAPITRE I : étude des courbes conventionnelles de traction

La courbe de traction rationnelle délivre donc des informations plus importantes que l'essai classique. L'intérêt est d'en déduire des lois permettant de modéliser le comportement du matériau. Cependant les propriétés de traction sont souvent définies à partir d'une courbe conventionnelle de traction.

## 1.3. Propriétés de traction

D'une façon générale, on peut estimer les principales propriétés mécaniques à partir d'une courbe conventionnelle de traction d'un matériau à comportement ductile en traction.

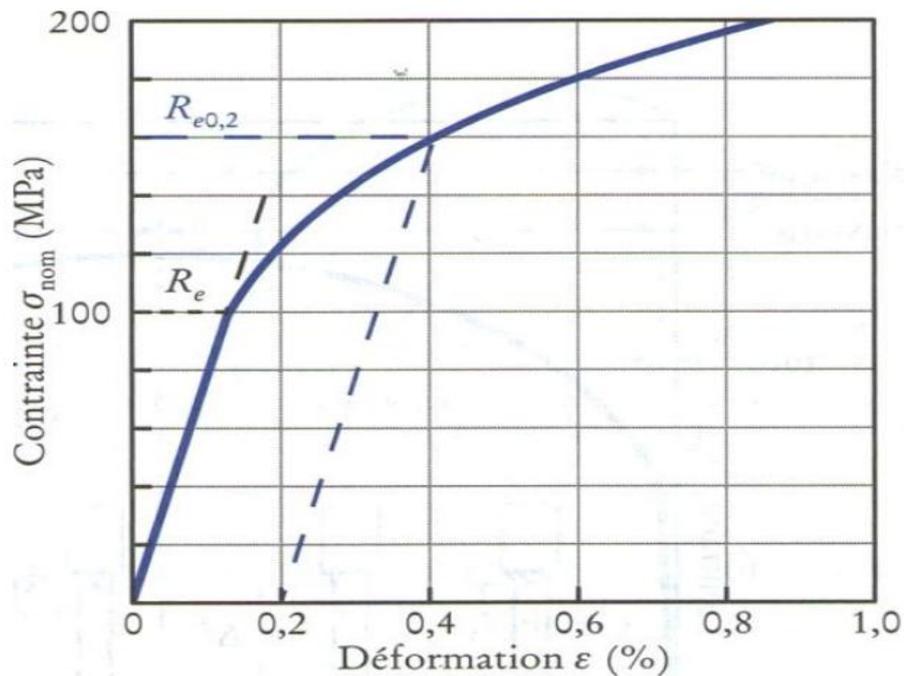


**Figure I.29.** Représentation d'une courbe de traction (matériau ductile)

L'exploitation de la courbe de traction permet de distinguer deux domaines fondamentaux :

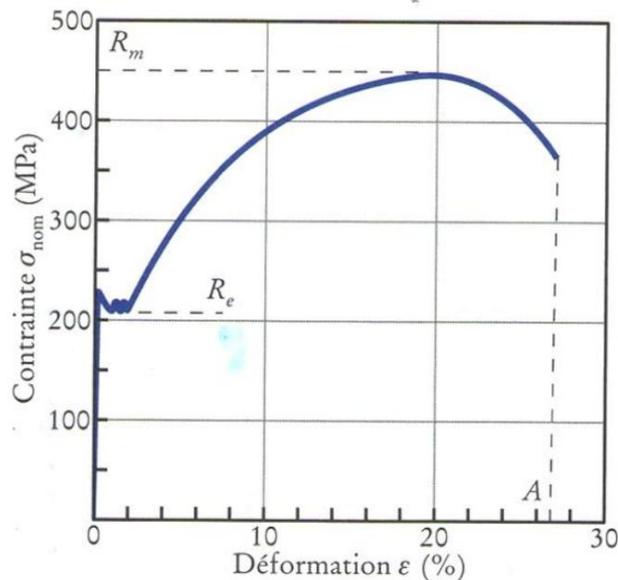
### 1.3.1 Domaine élastique linéaire :

Pendant la première partie de l'essai, l'éprouvette a un comportement élastique linéaire et obéit la loi de Hooke. Théoriquement la pente de la droite est égale au module d'Young ; en pratique, le module d'élasticité est très rarement mesuré de cette façon, car, dans le domaine élastique, les déformations sont très faibles, et la précision des mesures laisse alors à désirer. La limite de ce domaine est marquée par une propriété importante. C'est la limite élastique  $R_e$ .



**Figure I.** Détermination de la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % ( $R_{e0,2}$ ) d'un alliage d'aluminium

En toute rigueur, la limite d'élasticité  $R_e$  correspond à la contrainte à partir de laquelle le comportement du matériau s'écarte de la loi de Hooke, c'est-à-dire au moment où apparaît la première déformation plastique irréversible. En d'autres termes, la limite d'élasticité devrait donc correspondre, à la contrainte à partir de laquelle il n'y a plus proportionnalité entre contrainte et déformation. En pratique, même si sa définition est simple, une telle limite de proportionnalité est très difficile à apprécier, car le passage du domaine élastique au domaine plastique se fait de façon progressive ; la limite de proportionnalité, ou limite d'élasticité vraie  $R_e$  dépend donc de la précision que l'on a sur la mesure de l'allongement. On lève toute ambiguïté en définissant une limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 %, notée  $R_{e0,2}$  : Elle définit la contrainte à laquelle correspond une déformation plastique permanente égale à 0,2 %. Certains alliages (c'est le cas en particulier des aciers doux) ont un comportement en traction telle que la transition entre les domaines élastique et plastique est discontinue. Dans ces cas, la limite d'élasticité  $R_e$  ou  $R_{e0,2}$  est définie comme la valeur inférieure de la discontinuité.



**Figure I.** Courbe de traction d'un acier doux ( $Fe-0,15\%C$ ) présentant une discontinuité à la limite d'élasticité.

## 1.4. Domaine plastique :

Dans la seconde phase de l'essai, le comportement du matériau n'est plus linéaire puisque la déformation élastique est suivie de la déformation plastique qui se manifeste de deux façons

### i) Déformation plastique homogène :

Dans ce sous-domaine qui est compris entre la limite élastique et se poursuit jusqu'à la valeur maximale de la contrainte, le matériau se consolide par phénomène d'écrouissage. Le taux de consolidation  $d\sigma/d\epsilon$  pente de la courbe  $\sigma = f(\epsilon)$ , diminue quand la contrainte augmente et devient nul à la valeur maximale de la contrainte nominale appliquée. Cette dernière caractérise la résistance à la traction  $R_m$  qui se définit comme la contrainte maximale atteinte durant l'essai de traction. Les matériaux fragiles n'ont pas de domaine de déformation plastique, dans ce cas, la limite d'élasticité et la résistance à la traction sont confondues.

### ii) Déformation plastique hétérogène (*localisée*) :

Une fois que la courbe de traction ait atteint un maximum  $R_m$ , la contrainte nominale diminue bien que l'allongement continue de croître. Quand l'allongement augmente au-delà de celui qui correspond à la charge maximale atteinte, un nouveau phénomène apparaît (fig. I.31) : localement, la consolidation du matériau ne peut plus compenser l'augmentation de la contrainte. La déformation n'est plus homogène, mais elle est localisée dans la zone de striction (voir § I.10.5). Ce

## CHAPITRE I : étude des courbes conventionnelles de traction

---

phénomène se traduit par une réduction localisée des dimensions transversales de l'éprouvette se produisant au cours de l'essai. Il est caractérisé par le coefficient de striction (équation I.17).

$$Z = \frac{S_0 - S_F}{S_0} \times 100\% = \frac{\Delta S}{S_0} \times 100\%$$

ou

$S_0$  est la section initiale de l'éprouvette ;

$S_f$  est la section finale de l'éprouvette.

Finalement, la rupture se produit dans la zone de striction, là où la section est la plus faible. Le comportement ductile du matériau peut être mis en relief à partir de l'allongement à la rupture. Cette caractéristique peut être lue directement sur la courbe de traction ou mesurée sur l'éprouvette rompue (équation I.18).

$$A = \frac{l_f - l_0}{l_0} \times 100\% = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100\% \quad (\text{I.18})$$

L'allongement permanent après rupture est une mesure de la ductilité ; il est nul pour les matériaux fragiles.

### 1.5. Essais de dureté :

#### 1.5.1. Domaines de la dureté :

La détermination des propriétés mécaniques des couches minces et de la surface des matériaux est souvent délicate. Les raisons principales en sont les hétérogénéités de la matière.

L'essai de dureté consiste à mesurer l'effet occasionné par le contact, sous une pression donnée, d'un matériau de géométrie définie (*indenteur*) et de la surface d'un échantillon.

## CHAPITRE I : étude des courbes conventionnelles de traction

De nouvelles techniques ont élargi le champ d'application de l'essai de dureté. Ainsi les fabricants proposent maintenant des appareils permettant de mesurer quelques caractéristiques supplémentaires (*module Young, module de Coulomb, coefficient de Poisson, viscosité, forces d'adhésion (entre la pointe et le substrat) ou encore ténacité et énergie de rupture, etc.*) à partir de l'enregistrement de la courbe force-déplacement [22]. Plusieurs domaines de dureté peuvent être définis en fonction de la charge appliquée: Bückle [23] a introduit en 1965 la notion de la macrodureté pour des charges supérieures à 3÷5 kgf et celle de microdureté pour des charges inférieures à 100÷200 gf. Le domaine intermédiaire étant celui de la dureté sous charge réduite. Dans les années 80, est apparu le domaine de nanodureté qui correspond à des charges appliquées inférieures à 1gf.

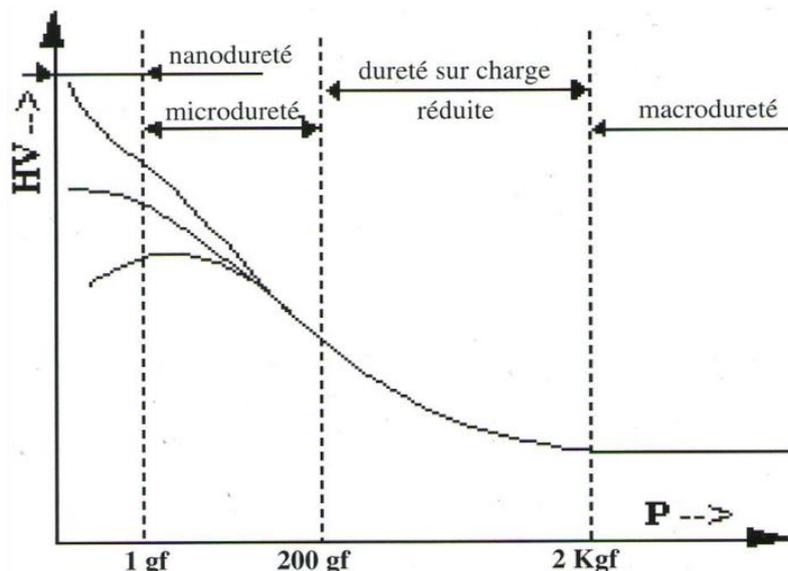


Figure I.. Définitions des différents domaines de dureté [23]

L'essai peut être conduit selon les méthodes statique et dynamique. La méthode statique qui regroupe les essais par indentation est la plus répandue. La méthode dynamique dans laquelle, la pointe du pénétrateur est en mouvement relatif par rapport à la surface du matériau à tester, permet d'avoir une idée de l'amortissement et de la rigidité de la surface soit par oscillation d'un duromètre pendulaire, soit par rebond d'une masse tombante, ou soit par la rayure d'indenteur de forme géométrique bien définie.

Les essais de dureté (*dynamique ou statique*), présentent l'avantage d'être simples, rapides, et non destructifs. Ils offrent un moyen intéressant et très employé dans l'industrie et les laboratoires [22]

# CHAPITRE I : étude des courbes conventionnelles de traction

La littérature rapporte l'existence de plusieurs critères de dureté qui dans la majorité des cas sont classés selon :

- La géométrie de l'indenteur (*pyramide, cône, sphère etc.*)
- Le type et le mode de sollicitation, suivant le comportement viscoélastique que l'on désire mettre en évidence : fluage, recouvrance, relaxation ou amortissement. - Les normes et les appareils correspondant à chaque classe.
- La taille de l'empreinte laissée par l'indenteur sur la surface.
- Les techniques de mesure peuvent être *groupées essentiellement en 3 catégories* :

## 1. 5.2. Essais sclérométriques ou par rayures :

Dans ces essais proposés par Moh [24] Une pointe en diamant raye le matériau. La dureté est qualifiée par la géométrie de la rayure engendrée. Le pénétrateur de forme géométrique bien déterminé (*sphère, cône, pyramide, etc.*), glisse sur la surface du corps à tester, selon une direction parallèle à la surface du corps à une vitesse constante. On impose une charge perpendiculaire constante. Les grandeurs mesurées sont principalement la force tangentielle, et la profondeur de pénétration.

L'essai de dureté par rayage impose un niveau de déformation au matériau de la surface à tester par l'intermédiaire de la pointe. Plus précisément c'est la géométrie de la pointe qui va déterminer le niveau de déformation.

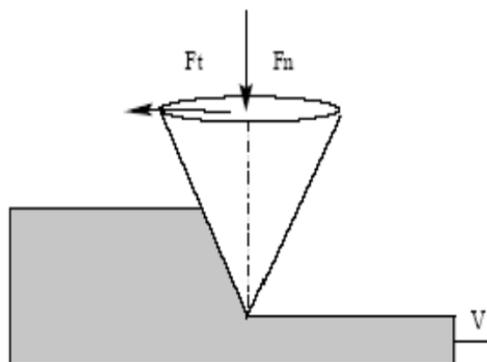


Figure I. Schématisation de l'essai de glissement-rayure (*pointe conique*).

## 1.5 .3 Les essais par rebondissement :

Dans ces essais dits de Shore, la dureté est caractérisée par la capacité du matériau à restituer l'énergie reçu au cours du choc avec une bille tombante. On fait chuter une masse d'acier terminée

## CHAPITRE I : étude des courbes conventionnelles de traction

---

par un diamant arrondi. La masse est guidée dans sa chute par un tube lisse. La chute de la masse est bien verticalement et d'une hauteur fixe. La dureté est évaluée par une rebondimètre (*du type scléroscope Shore*) relie dureté et hauteur de rebond, cette dernière étant d'autant plus importante que la pénétration est faible, donc le matériau dur.

Deux gammes de dureté Shore existent : Shore A ou le pénétrateur est de forme géométrique d'un cône tronqué, a sommet plat pour les produits souples et shore D pour les matériaux rigides de forme géométrique d'un cône émoussé.

### **1.5.4. Les essais par indentation :**

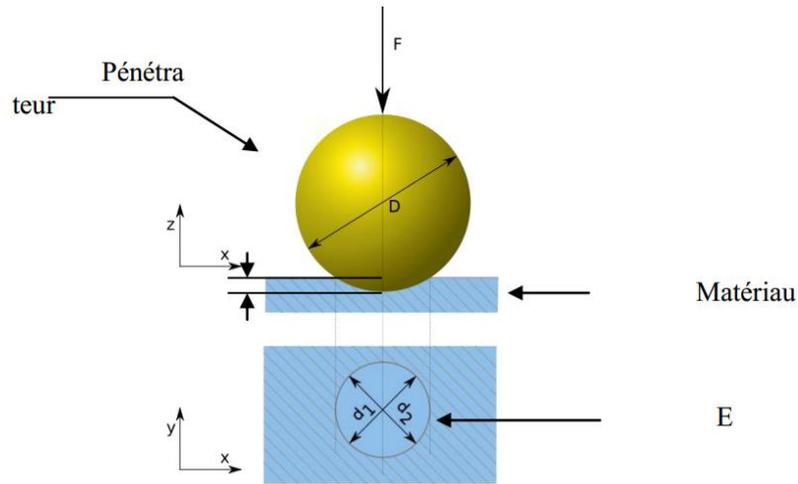
Il s'agit des essais les plus couramment pratiqués. Le principe est toujours le même : un pénétrateur indéformable de forme géométrique précise, pénètre dans le métal sous l'action d'une charge constante et laisse une empreinte dans le matériau à tester. On mesure les dimensions de l'empreinte et on en déduit la dureté.

Dans une première approche, On peut relier de manière assez simple la limite d'élasticité  $R_e$  avec la surface de l'empreinte : plus l'objet pénétrant s'enfoncé, plus la surface  $S$  de pression s'agrandit, donc la force  $F$  étant constante, plus la contrainte diminue. Lorsque la contrainte n'est pas suffisante pour déformer plastiquement le solide à tester, l'objet pénétrant s'arrête et la dureté est calculée à partir du rapport de la force appliquée sur la surface indentée.

$$R_e = \frac{F}{S}$$

#### **1.5.4.1 Essai de dureté Brinell :**

L'essai a été édité dès 1924. Il consiste à faire pénétrer dans le métal à tester, une bille polie de forme sphérique en acier trempé ou en carbure de tungstène. Le diamètre  $D$  utilisé peut valoir 1 mm, 2,5 mm, 5 mm et 10 mm. La charge appliquée sur le métal est maintenue pendant 15 à 30 s selon le solide. Après l'annulation de la charge, la bille laisse dans le métal une empreinte circulaire permanente dont on mesure le diamètre  $d$ .



**Figure** Principe de dureté brinell

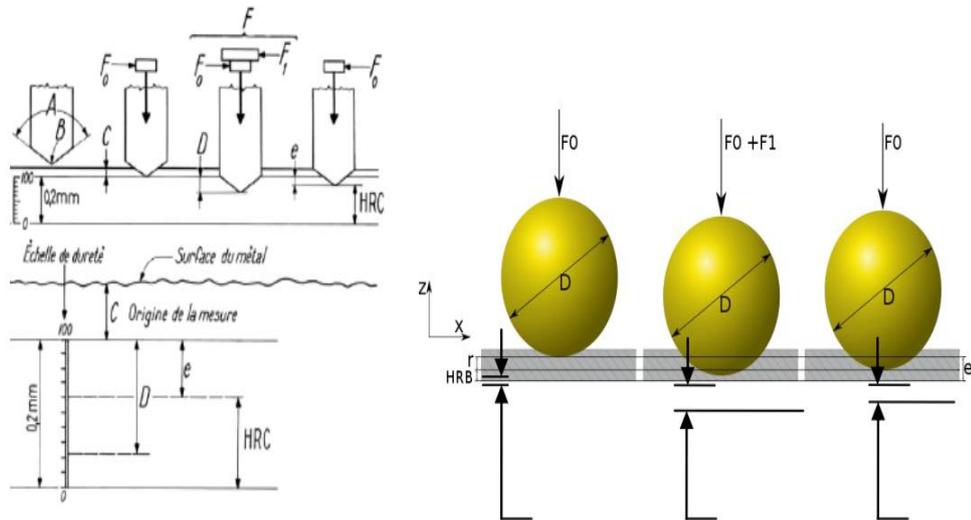
La force étant exprimée en *kgf*, le diamètre de l'empreinte *d* en *mm* et la dureté *Brinell* est exprimée en *kgf/mm<sup>2</sup>* selon la relation suivante .

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

avec:  $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ .

### 1.5.4.2. Essai de dureté Rockwell :

L'essai consiste à mesurer la profondeur rémanente de l'empreinte indentée. Le pénétrateur de forme géométrique conique pour le critère ou bien sphérique pour le critère est appuyé sous faible charge, sur la surface à essayer et dans des conditions bien précises. Le pénétrateur conique est en diamant de section circulaire et d'angle au sommet  $120^\circ$  à pointe arrondie sphérique de rayon de  $0,2\text{mm}$ . Le pénétrateur sphérique est une bille d'acier trempée polie de diamètre  $1,588\text{mm}$  ou  $3,175\text{mm}$ . L'essai se déroule en trois phases.

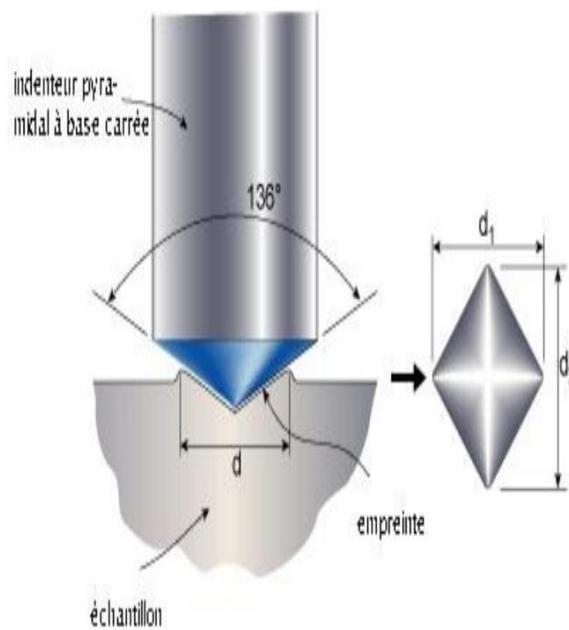


**Figure I.** Principe de mesure de la dureté Rockwell : a) échelle HRC, b) échelle HRB.

- i) Une phase I de pénétration initiale avant charge additionnelle : après application d'une charge initiale  $F_0 = 98N$  (10 kgf). La profondeur de pénétration étant l'origine qui sera utilisée pour la mesure de la dureté.
- ii) Une phase P de pénétration avec charge additionnelle : Sous la charge supplémentaire  $F_1$ , le pénétrateur s'enfonce d'une profondeur  $P$
- iii) Une phase R de pénétration rémanente sans la charge additionnelle : La force  $F_1$  est relaxée et on lit les indications de l'enfoncement.

### 1.5.4.3. L'essai de dureté Vickers :

Il consiste à imprimer dans le métal testé une empreinte avec un pénétrateur en diamant de forme géométrique pyramidale à base carrée et d'angle au sommet entre deux faces opposées de  $136^\circ$ , sous l'action d'une force connue. On mesure la diagonale de l'empreinte carrée laissée par le pénétrateur.



**Figure I.25.** Principe de dureté Vickers.

Généralement la gamme des forces utilisables ( $5$  à  $100$  kgf) permet d'appliquer cette méthode avec toutes les dimensions d'échantillons. Pour des raisons de fiabilité de l'essai, la force est choisie de telle manière à donner une empreinte ayant la diagonale moyenne inférieure aux deux tiers de l'épaisseur. D'autres sources préconisent que la profondeur de pénétration ne dépasse pas le huitième de l'épaisseur de la pièce à tester.

La force  $F$  étant exprimée en kgf, le diamètre de l'empreinte  $d$  en mm et la dureté Vickers est exprimée en kgf/mm<sup>2</sup> selon la relation suivante .

$$HV = \frac{1,8454P}{d^2}$$

avec: 
$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}.$$

L'essai de Vickers est celui qui fournit la plus grande diversité de renseignements. Il possède deux avantages principaux : être souvent non destructif et pouvoir être répété un grand nombre de fois ; c'est-à-dire se prêter à une interprétation statistique (*dislocation des diagonales d'empreinte suivant une loi gaussienne*).

## 1.6. Phénomène d'écrouissage :

### 1.6.1. Mécanisme et effet de l'écrouissage :

La déformation plastique d'un matériau cristallin modifie ses propriétés de par son influence sur sa structure interne ; ces évolutions de propriétés et de microstructure, appelées écrouissage, jouent un rôle très important pour les caractéristiques mécaniques du matériau. En effet, le durcissement par écrouissage est largement utilisé pour augmenter les caractéristiques mécaniques de nombreux alliages métalliques.

Au cours d'un essai de traction, la consolidation d'un matériau est le résultat d'un mouvement et d'une multiplication des dislocations qui balaient les plans de glissement et s'entrecroisent entre elles en augmentant leur densité.

Pour un matériau poly-cristallin, cette consolidation se traduit par une augmentation de la contrainte dans le domaine plastique lorsque la déformation augmente. Cette augmentation de la contrainte persiste jusqu'à ce que sa valeur atteigne un maximum

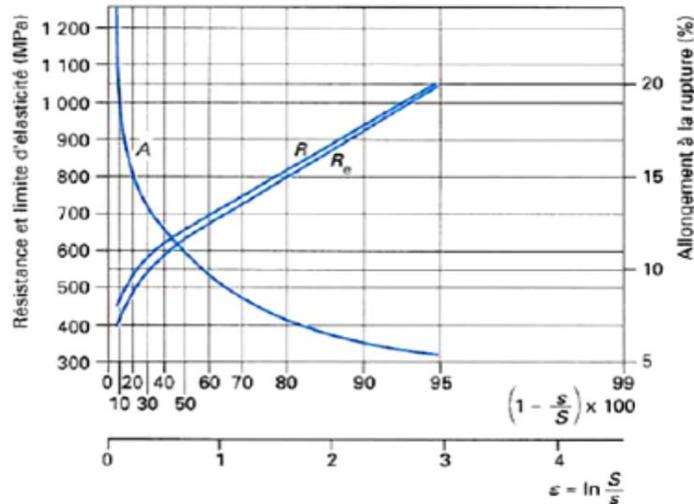
c'est à dire celle de la résistance à la traction ( $c_{max} = R_m$ )

L'écrouissage c'est l'effet des interactions entre dislocations qui augmente avec la multiplication des dislocations au cours de la déformation plastique. Cet effet est responsable du fort durcissement des alliages de structure cubique à faces centrées ; tels que les alliages des cuivres

### 1.6.2. Influence de l'écrouissage sur les caractéristiques mécaniques.

L'écrouissage a une influence sur les propriétés mécaniques des aciers. Les effets de ce phénomène se traduisent par l'amélioration des caractéristiques telles que :

- sa résistance à la traction augmente et semble tendre vers une limite ;
- sa limite d'élasticité croît plus rapidement que la résistance et finit par tendre vers la même valeur.
- l'allongement baisse rapidement et ne décroît par la suite que lentement.



**Figure I.32.** Variations des caractéristiques mécaniques en fonction de l'écroutissage d'un fil d'acier à 0,06 % C.

### 1.6.3. Courbe et coefficient d'écroutissage :

Dans le domaine des déformations plastiques homogènes (avant l'apparition de la striction), le phénomène d'écroutissage peut être évalué sur les courbes rationnelles de traction. Sur une courbe de traction classique, la charge à la rupture est une grandeur conventionnelle puisque elle ne tient compte que de la section initiale  $S_0$

$$R_m = \sigma_{max} / S_0$$

Cela empêche de tenir compte dans les calculs de plasticité car la section est variable dans le temps. A cet effet, on définit une contrainte vraie  $\sigma_v$

qui correspond à la charge appliquée rapportée à la section instantanée  $S = S(t)$

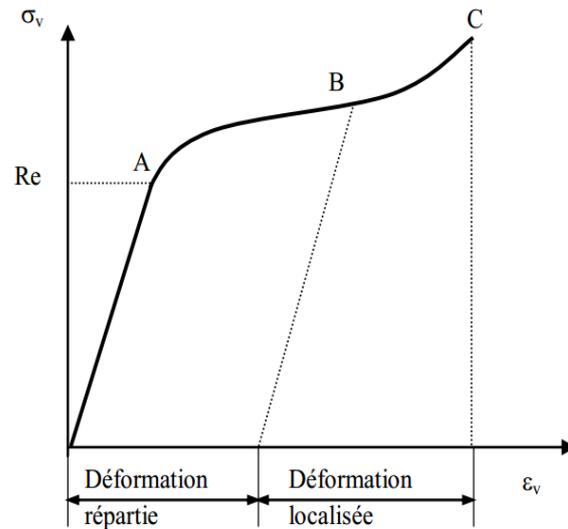
$$\sigma_v = \frac{F}{S}$$

Une portion parabolique AB de cette Courbe peut être mise sous une certaine forme empirique qui relie la contrainte vraie  $\sigma_v$  L'expression la plus utilisée est celle de *Lüduik*

$$\sigma_v = \sigma_0 + K \cdot (\varepsilon_v)^n$$

$\sigma_0$  Et  $k$  sont des constantes du matériau  
Et  $n$  est le coefficient d'écroutissage

## CHAPITRE I : étude des courbes conventionnelles de traction



**Figure.** Phénomène d'écrouissage sur une courbe rationnelle de traction.

Le coefficient d'écrouissage caractérise la déformation rationnelle répartie (*homogène*) que peut subir un matériau et l'aptitude à répartir uniformément cette déformation. Ce coefficient dépend du matériau et du traitement qu'il a subi. En général

On a :

$$0,1 \leq n \leq 0,4$$

**N.B:**

Si  $n = 0,1$  : le matériau a une faible consolidation ;

Si  $n = 0,4$  : le matériau a une forte consolidation ;

Si  $n = 0$  : Le matériau ne subit aucune consolidation, C'est donc que ce matériau est parfaitement plastique.

**Remarque :** Pour mettre en évidence le coefficient d'écrouissage, il est commode de tracer la courbe rationnelle en coordonnées logarithmiques :

# CHAPITRE I : étude des courbes conventionnelles de traction

On a (pour  $\sigma_0 = 0$ )

$$\ln \sigma_v = \ln [k \cdot (\varepsilon_v)^n]$$

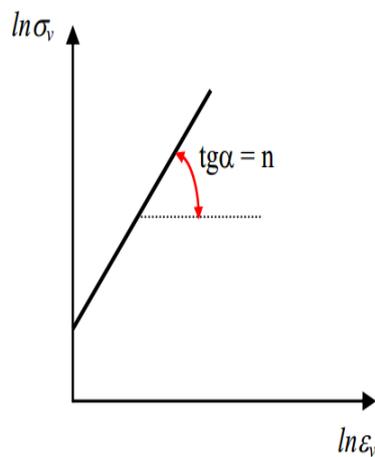
Où :

$$\ln \sigma_v = \ln k + n \cdot \ln (\varepsilon_v)$$

Dans ce cas, la courbe :

$$\ln \sigma_v = f(\ln \varepsilon_v)$$

Représente une droite de pente  $n$ .



**Figure. I.34.** Courbe rationnelle de traction en coordonnées logarithmiques.

## 1.6.4 Modélisation des courbes conventionnelles

### 1.6.4.1 Contrainte et déformation vraie

Lorsque les déformations sont infiniment petites ( $\varepsilon \rightarrow 0$ ), on considère que le volume reste constant (relation V.1):

$$Sl = S_0 l_0 \Rightarrow S = \frac{S_0 l_0}{l} \quad (V.1)$$

D'où :

$$\sigma_v = \frac{Fl}{S_0 l_0} \quad (V.2)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{l}{l_0} - 1 \Rightarrow \frac{l}{l_0} = \varepsilon + 1 \quad (V.3)$$

$$\sigma_v = \frac{F}{S_0} (1 + \varepsilon) = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (V.4)$$

La déformation instantanée (relative) sera donc définie à partir des allongements petits ( $dl$ ) à un instant ( $t$ ). Dans ce cas la déformation relative sera :

$$\varepsilon_v = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l_i} = \int_{l_0}^{l_0 + \Delta l} \frac{dl}{l} = \ln(l) \Big|_{l_0}^l = \ln(l) - \ln(l_0) = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + \varepsilon)$$

Où :  $l_i$  est la Longueur instantanée à tout instant  $t$  (longueur réelle) ;

$\varepsilon$  est la déformation nominale ;

$\varepsilon_v$  est la déformation rationnelle (relative).

$$\varepsilon_v = \ln(1 + \varepsilon) \quad (V.5)$$

Cette déformation  $\varepsilon_v$  diffère peu de la déformation ordinaire  $\varepsilon$  pour les faibles valeurs de celui-ci. La différence devient importante au de 20% de la déformation.

$\ln 1 + \varepsilon \approx \varepsilon$  Quand  $\varepsilon \rightarrow 0$

Il en est de même pour les contraintes où selon la relation (V.4), on peut égaliser :  $\sigma_v = \sigma$

### 1.6.4.2 Obtention de la courbe rationnelle

La courbe rationnelle de traction est la courbe  $\sigma_v = (\varepsilon_v)$ . Sur cette courbe (fig. V.1), il n'y a pas de différence avec le tracé ordinaire pour la partie linéaire et la limite d'élasticité car les déformations élastiques sont très faibles.

Entre

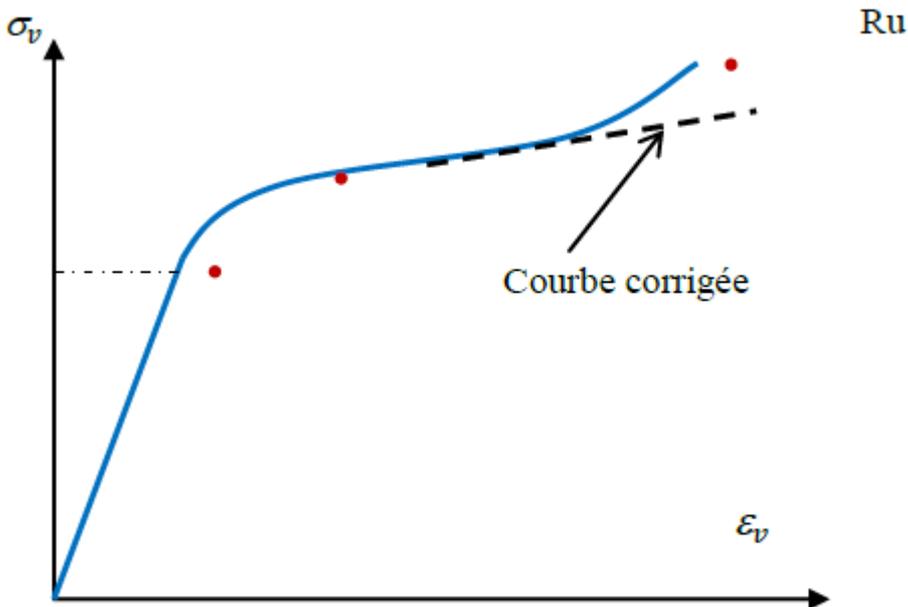


Figure V.1 Courbe rationnelle de traction

Entre la limite d'élasticité au point A et le point B correspondant à la charge maximale, la courbe a une forme parabolique. Au-delà du point B jusqu'à la rupture au point C ; L'existence de la striction (fig. V.2), impose de tenir compte de l'effet de concentration des contraintes.

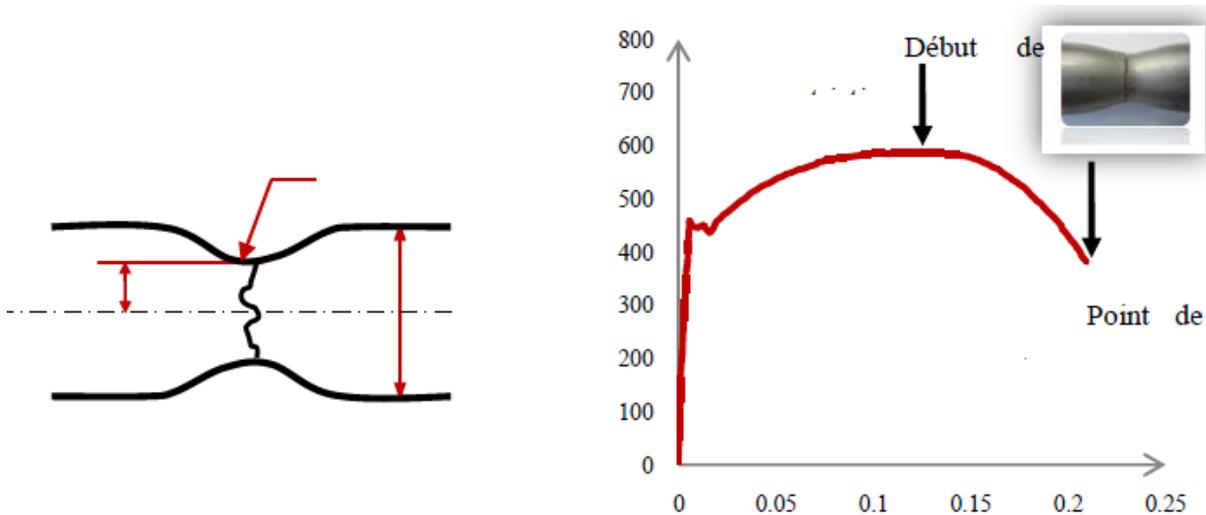
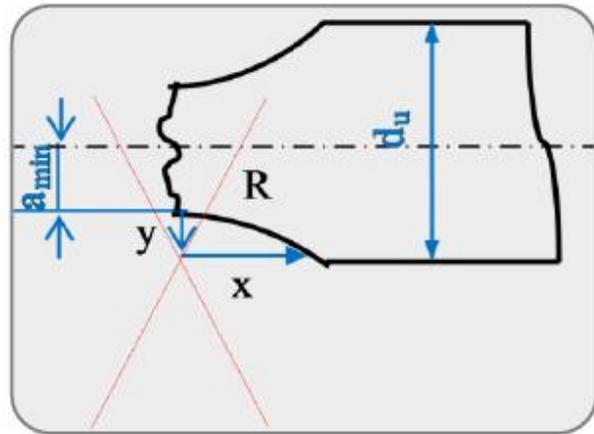


Figure V.2. Evaluation de point de rupture.

La dernière valeur de la contrainte vraie ( $\sigma_v$ ) juste avant le début de la striction c'est à dire au démarrage de l'instabilité plastique et la déformation vraie ( $\epsilon_{vB}$ ) correspondante sont calculées à partir de la géométrie de l'éprouvette (fig. V. 3).



a)



b)

**Figure V.3.** Paramètres géométrique de la zone de striction ; a) microscope optique de mesure, b) principe de mesure

Aux points B et C de la figure V. 2b ; limitant la zone de striction les grandeurs réelles sont données par :

Ainsi au point (B), on a

$$\sigma_{vB} = \frac{F}{S_u} \quad (\text{V. 6})$$

$$\varepsilon_{vB} = 2. \ln \left( \frac{d_0}{d_u} \right) \quad (\text{V. 7})$$

Où :  $d_0$  est le diamètre initial de l'éprouvette;  $d_u$  est le diamètre utile de l'éprouvette après striction.

Au moment de la rupture (point C), la contrainte vraie ( $\sigma_{vC}$ ) , peut être approchée en tenant compte du facteur de triaxialité des contraintes qui permet de réduire la valeur de la contrainte le long de l'axe principale de l'éprouvette. La formule de correction la plus utilisée est celle de *Bridgman* [76]. Cette correction qui ne dépend pas des paramètres mécanique du matériau mais seulement d'un facteur géométrique ( $a/R$ ), donne la valeur de la contrainte vraie ( $\sigma_v$ ) en fonction de la contrainte nominale ( $\sigma_z$ ) (relation V.8):

## CHAPITRE I : étude des courbes conventionnelles de traction

---

$$\sigma_{vC} = \frac{\sigma_z}{\left(1 + 2 \frac{R}{a_{min}}\right) \times \ln \left(1 + \frac{a_{min}}{2.R}\right)} \quad (V.8)$$

Où :  $a_{min}$  est le rayon de la section minimale ;  $R$  est le rayon de courbure de la zone de striction

$$R = \frac{x^2 + y^2}{2y}$$

Le rayon de courbure  $R$  et le diamètre de la zone uniforme ( $d_u$ ) sont déterminés graphiquement par un microscope d'atelier avec une précision de  $0.005 \text{ mm}$  (fig. V.3a), au niveau du département de mécanique de l'université de Annaba. Le tableau V.1 illustre les mesures des paramètres géométriques pour les différentes éprouvettes rompues en traction.

La déformation vraie correspondante (point C) sera

$$\varepsilon_{vC} = 2 \cdot \ln. \left( \frac{d_0}{a_{min}} \right) \quad (V.9)$$

Enfin, la courbe matérialisant le domaine d'instabilité plastique entre les points (B et C) peut être tracée par approximation linéaire ou parabolique entre ces deux points

### Objectifs spécifiques :

- Connaitre les types des traitements thermiques
- Identifier les phénomènes microstructuraux dus aux traitements thermiques

### Eléments de contenus :

1. Trempe
2. Revenu
3. Recuit

### Introduction :

Les traitements thermiques sont constitués par un certain nombre d'opérations combinées de chauffage et de refroidissement ayant pour but d'améliorer les caractéristiques des matériaux et rendre ceux-ci plus favorables à un emploi donné, à partir des modifications suivantes : Augmentation de la résistance à la rupture et de la limite élastique  $R_m$ ,  $R_e$ , Augmentation de la dureté, permettant à des pièces de mieux résister à l'usure ou aux chocs. De régénérer un métal qui présente un grain grossier (affiner les grains, homogénéiser la structure) cas des matériaux ayant subi le forgeage. De supprimer les tensions internes (écrouissage) des matériaux avant d'être soumis à une déformation plastique à froid (emboutissage, fluotournage).

En dehors du recuit de recristallisation qui permet de supprimer l'écrouissage, les traitements thermiques ne s'appliquent pas aux métaux purs, mais seulement à quelques alliages pour lesquels on recherche principalement une augmentation de la limite élastique et une diminution de la fragilité.

### II- La Trempe

#### II-1- Trempe de masse.

**II-1-1- 1But :** La trempe est un traitement thermique qui donne à l'acier une grande dureté par transformation de l'austénite en martensite.

**II-1-1-2- Principe :** Une trempe se compose de trois phases principales :

**a- Chauffage :** destiné à amener l'acier à l'état austénitique.

i. Acier hypoeutectoïde (de 0 à 0,85% de carbone)

Température de chauffage ( $A_{c3} + 50^\circ\text{C}$ ). La ligne  $A_{c3}$  va de  $721^\circ\text{C}$  à  $906^\circ\text{C}$ , le chauffage d'un acier hypoeutectoïde dépend donc de sa teneur en carbone.

ii. Acier eutectoïde (0,85 % de carbone)

## Chapitre II : traitement thermique

---

Température de chauffage ( $Ac1 + 50^{\circ}C$ ) soit environ  $780^{\circ}C$ .

iii. Acier hypereutectoïde (de 0,85 à 1,7% de carbone)

Température de chauffage ( $Ac1 + 50^{\circ}C$ ) soit environ  $780^{\circ}C$ .

### **b- Maintien à température d'austénisation. Dépend :**

iv. Des dimensions et des formes de la pièce.

v. Des types d'aciers, 15 min pour les aciers ordinaires, 30 min pour les aciers alliés, en particulier pour ceux contenant des carbures.

**c- Refroidissement (air, eau ou huile) :** C'est lui qui conditionne la structure finale. De lui dépend l'apparition de nouveaux constituants tels que : (dans l'ordre croissant de dureté) troostite, bainite, martensite.

### **d- Fluide de trempe**

La trempe s'effectue par immersion dans l'eau, par pulvérisation d'eau ou par soufflage d'air.

Le fluide le plus utilisé est l'eau froide ( $T < 40^{\circ}C$ ). Dans certain cas, l'eau froide génère un refroidissement trop rapide (exemple : pièces de formes compliquées) et génère des contraintes internes préjudiciables à l'utilisation de la pièce (déformations, risque de corrosion sous contrainte ou même rupture de la pièce si les contraintes sont trop élevées). Dans ce cas, on peut utiliser de l'eau chaude ( $T > 50^{\circ}C$ ) ou de l'huile. Dans certains cas assez rares, il est possible d'utiliser d'autres fluides comme des liquides à base de glycol pour minimiser la formation des contraintes internes. Il est possible également de relaxer les contraintes en effectuant un travail à froid immédiatement après la trempe (sur *trempe fraîche*). On peut ainsi étirer la pièce ou la comprimer.

Pour éviter la formation d'un film de vapeur d'eau autour de la pièce (phénomène de caléfaction) on peut revêtir la pièce d'un revêtement. Cette opération s'appelle le potéyage

### **II-1-2- 1Trempe superficielle ou localisée.**

**1-2-1- But :** C'est obtenir une grande dureté en surface tout en conservant un bon allongement dans la zone sous-jacente jusqu'au centre de la section.

**1-2-2- Principe :** Elle consiste à chauffer (ou par induction ou à la flamme) localement la surface d'une pièce en acier jusqu'à la température d'austénisation, à la refroidir ensuite à une vitesse suffisante. Le refroidissement s'effectue le plus souvent par jet d'eau sous pression.

**1-2-3- Matériaux utilisés :** Aciers ordinaires du type C42 ou faiblement alliés.

## **II-2 Le REVENU**

### **II-2.1 Principe et But de Revenu :**

La trempe anisotherme est en général un traitement énergétique conduisant à un métal à  $R_m$ ,  $R_e$ ,  $H$  élevées du fait de la présence recherchée de martensite, mais dont la ductilité ( $A\%$ ) et la résilience

## Chapitre II : traitement thermique

(K) sont très faibles pour la même raison. Si on tient compte également d'un niveau de contraintes propres souvent important, il est évident qu'un acier ne peut être utilisé en service directement à l'état trempé.

L'opération de revenu est destinée à corriger plus ou moins complètement ces inconvénients. Elle conduit à un métal de caractéristiques convenables présentant un compromis satisfaisant entre  $R_m$ ,  $R_e$ , d'une part et  $A\%$ ,  $K$  d'autre part. Contrairement à la trempe qui est une opération rapide et de contrôle difficile, le revenu permet un contrôle aisé des transformations et des propriétés du métal.

Le revenu est un traitement thermique effectué après trempe en continu, il consiste en :

- ✓ Un réchauffage à une température  $T_R < A_{c1}$ ,
- ✓ Un maintien de durée  $t_R$  à  $T_R$  ?
- ✓ Un refroidissement jusqu'à la température ambiante de préférence lentement.

Le revenu provoque une évolution du matériau vers un état plus proche de l'état physicochimique d'équilibre sans toutefois rechercher à atteindre celui-ci. Le choix de  $T_R$  et  $t_R$  permet de contrôler ce retour plus ou moins complet vers l'état d'équilibre.

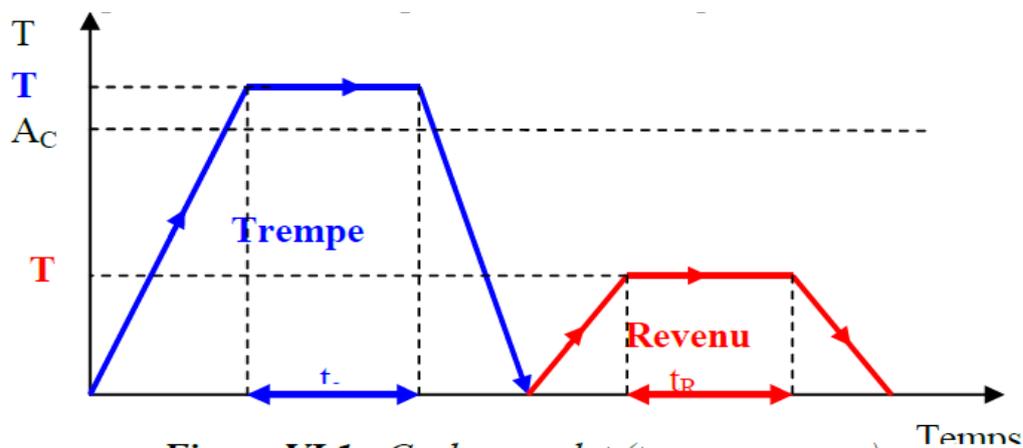


Figure VI.1 : Cycle complet (trempe, revenu)

### II-2. 2 DIFFERENTS TYPES DE REVENU :

En fonction du résultat attendu, on distingue plusieurs types de revenu :

- Revenu de relaxation ou de détente,
- Revenu de structure ou classique,
- Revenu de durcissement.

#### II-2.2.1. Revenu de relaxation ou de détente :

Il s'effectue entre  $180^{\circ}\text{C}$  et  $220^{\circ}\text{C}$  -  $250^{\circ}\text{C}$ . Il ne provoque aucune modification de structure mais une relaxation des contraintes multiples dues au refroidissement brusque de la trempe et au changement de structure austénite--martensite. Il provoque une légère diminution de la dureté

et une légère remontée de la résilience. Il est fait sur des pièces soumises à des fortes sollicitations sans choc ou devant conserver une forte dureté superficielle...

### **II-2.2.2 Revenu de structure ou classique :**

Dans ce cas, le revenu s'effectue entre 500°C et Ac1. On observe une augmentation des caractéristiques K, A et Z et une diminution plus importante de H, Rm et Re. Ce type de revenu permet d'établir un compromis entre les caractéristiques mécaniques suivant l'emploi des aciers.

### **II-2.2.3. Revenu de durcissement :**

Des revenus effectués entre 450 et 600°C sur des aciers alliés peuvent provoquer des durcissements appelés durcissements secondaires (cas des aciers à outils au chrome ou des aciers rapides). Il y a d'abord précipitation des carbures complexes maintenu en solution dans un reste d'austénite résiduelle puis une déstabilisation de cette dernière qui se transforme en martensite au moment du refroidissement. Ces deux transformations successives vont donc nécessiter un second revenu pour éviter que la martensite secondaire ne provoque pas fragilité excessive. (Dans certains aciers rapides, trois revenus successifs peuvent être nécessaires).

### ***II-2.3. EVOLUTION DES PROPRIETES AU COURS DE REVENU :***

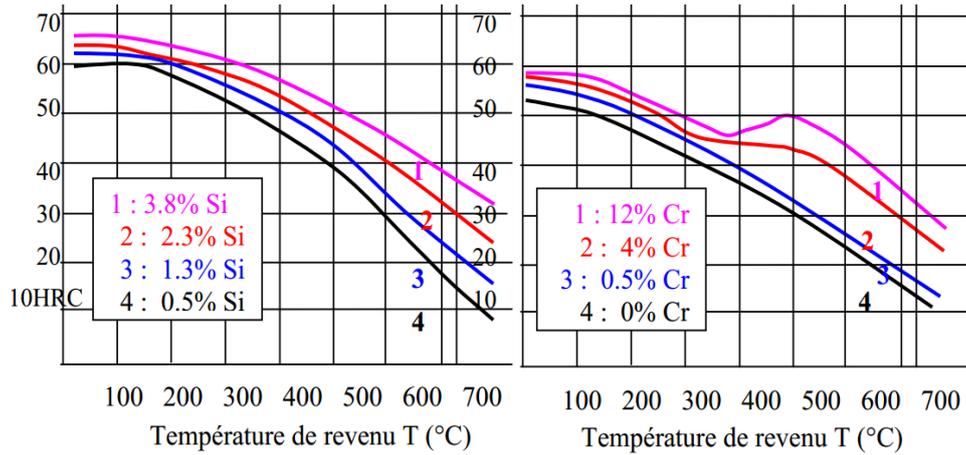
Les modifications structurales au cours de revenu ont des conséquences importantes sur les propriétés mécaniques. La variété des structures obtenues explique que le revenu constitue un moyen efficace et très souple pour obtenir un ensemble de propriétés ajustées aux exigences de fonctionnement et il faut envisager des interférences possibles pour expliquer finalement les variations des propriétés obtenues.

Les propriétés des aciers sont sensibles au revenu par l'influence de deux principaux facteurs : le premier est intrinsèque aux aciers et le deuxième leur est extrinsèque.

#### **II 2. 3.1. Influence de la composition chimique de l'acier :**

La composition chimique de l'acier est un facteur intrinsèque qui doit être connu avec une très grande précision pour pouvoir prédire et prévoir son comportement sous l'effet de revenu.

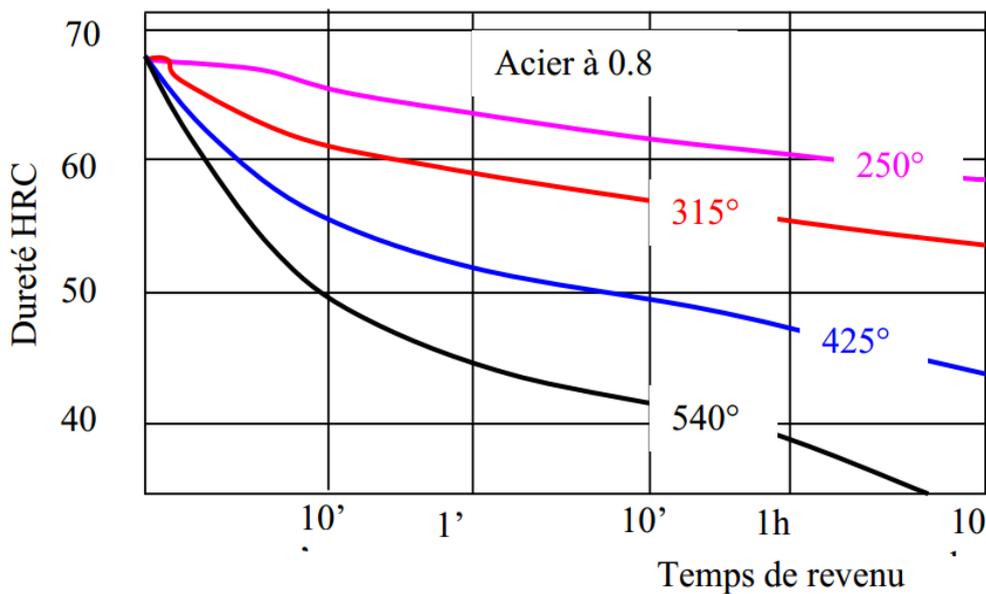
## Chapitre II : traitement thermique



**Figure II.2 : Influence de la teneur en éléments d'alliages sur la dureté des aciers à 0.35%C avec la température de revenu**

### II 2.3.2. Influence de la température et du temps de revenu :

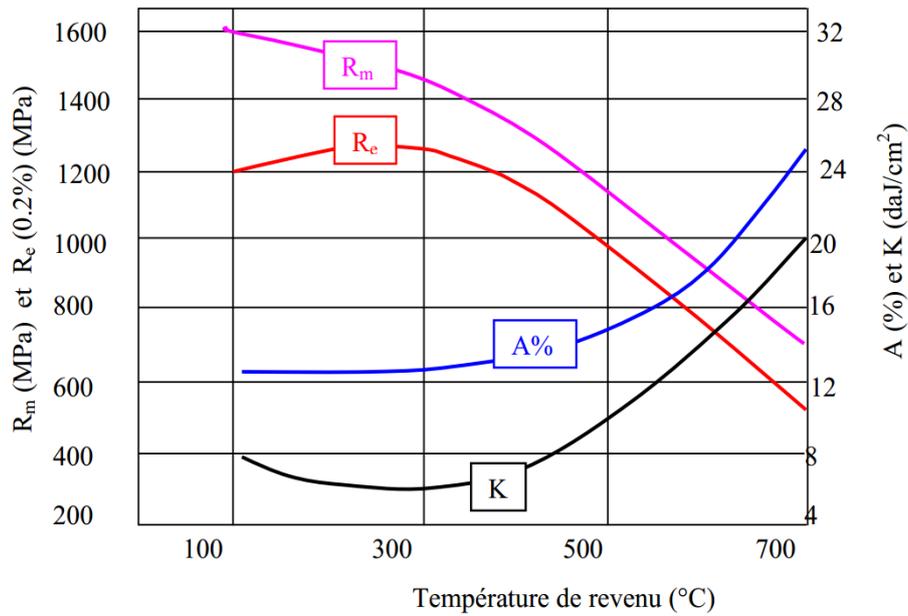
La température de revenu n'est pas la seule responsable de la diminution de la dureté. Elle se trouve justement soutenue par le temps de maintien. La figure (II.3) montre l'effet de ce facteur sur la dureté de l'acier eutectoïde (0.8% de carbone) revenu à plusieurs températures. Pour chaque température, la courbe caractéristique est marquée par une baisse notable de la dureté pendant quelques minutes suivie ensuite d'une diminution progressive mais très lente.



**Figure II.3 : Variation de la dureté en fonction du temps de maintien pour quatre températures de revenu de l'acier à 0.8%C.**

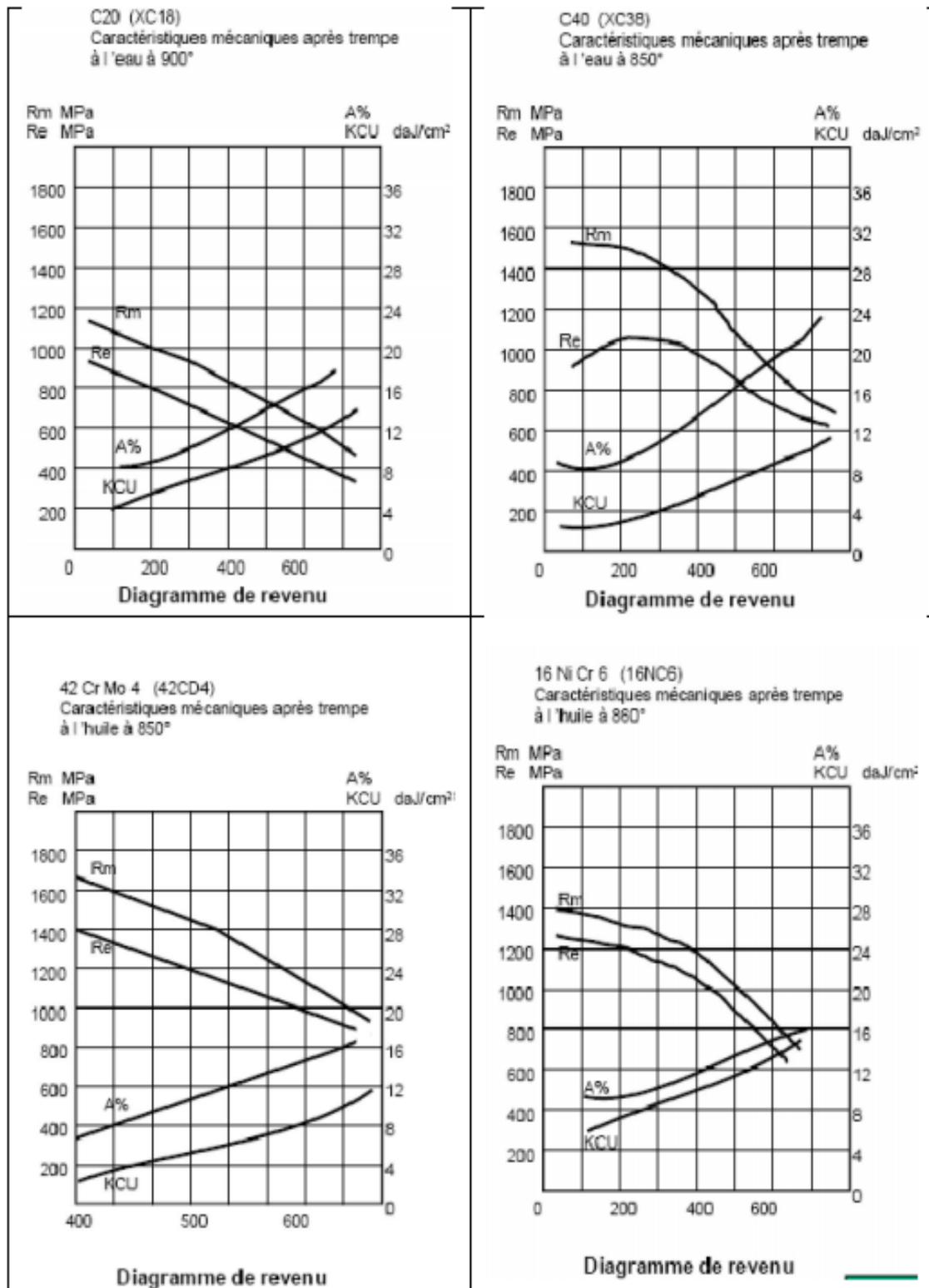
### II 2. 4-Comportement des caractéristiques mécaniques après traitement thermiques

Il s'avère donc que le revenu est un traitement qui a une influence sur les propriétés mécaniques des aciers. La variation de ces dernières présente une allure qui se répète dans toutes nuances d'aciers (figure II.4)



**Figure II 4 : Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu de l'acier 25CrMo4.**

## Chapitre II : traitement thermique



*Figure II.5 : Variation des propriétés mécaniques en fonction de la température de revenu de quelques métaux*

## Chapitre II : traitement thermique

### II 2-5-EN résumée :

Le revenu est un cycle thermique que subit la pièce, consistant en un chauffage entre 200° et 600°, puis d'un maintien à température suivi d'un refroidissement lent.

a) -chauffage à 200° mini pour éliminer les *tensions internes* dues au refroidissement brutal de la périphérie de la pièce sur le coeur dilaté. La contraction brutale de la périphérie, lors de la trempe, engendre des tensions entre le coeur et la périphérie.

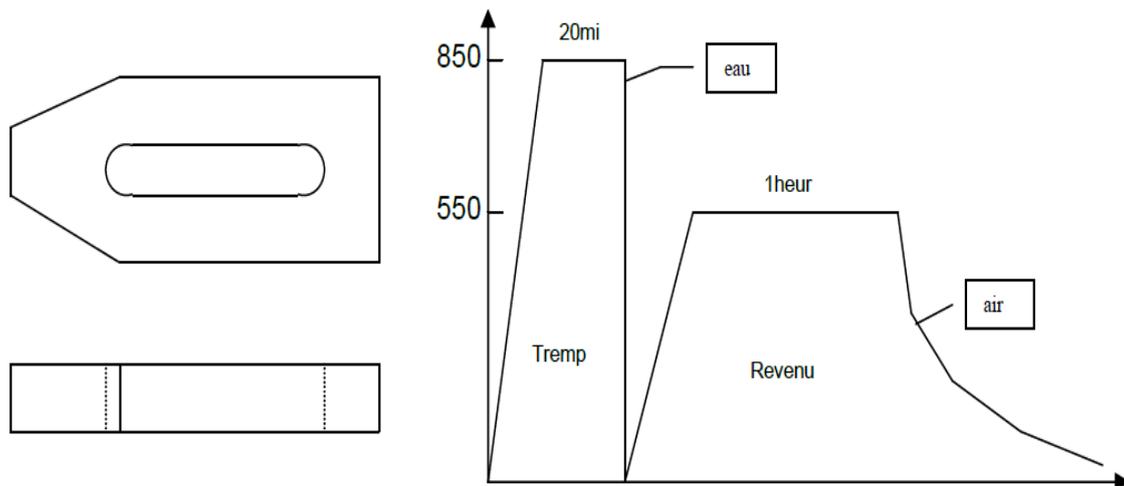
- entre 200° et 600° pour rechercher une valeur de caractéristique mécanique précise.

b) - maintien à température pendant une heure mini pour permettre l'élimination des tensions dans toute la masse.

c) - refroidissement lent pour éviter la formation de nouvelles contraintes ou tensions internes.

Exemple de Traitement Thermique pour une bride en C40 de longueur =120mm, et d'épaisseur=20mm.

Caractéristique demandée:  $R_m=800$  à  $900\text{Mpa}$



### Commentaires: Trempe

a) chauffage à 850° pour mettre l'acier dans le réseau cristallin cubique à face centrée correspondant au Fer  $\gamma$

b) maintien pendant 20 minutes à 850° pour dissoudre les carbures dans toute la masse de la pièce. Les atomes de carbone de carbure se dissocient et s'insèrent au centre des mailles du réseau du Fer  $\gamma$ .

c) refroidissement rapide en plongeant la pièce dans un bac d'eau. Le réseau cristallin (Fer  $\gamma$ ) revient en Fer  $\alpha$  de manière quasi instantané tout en gardant les atomes de carbone en solution forcée dans ce Fer  $\alpha$ . Ce nouveau constituant est appelé:

MARTENSITE.

## Chapitre II : traitement thermique

---

### *Revenu*

- a) chauffage à 550° pour atteindre la température permettant l'obtention des 800 à 900 Mpa.
- b) maintien pendant 1 h à 550° pour libérer toutes les tensions et garantir que la dureté à coeur soit la même que celle en surface
- c) refroidissement lent pour éviter la formation de nouvelles contraintes.

### **II 3- Le Recuit :**

#### **II 3 -1- But :**

Le but est de mettre l'acier dans une certaine structure pour permettre l'usinage ou la mise en forme par déformation plastique ou de régénérer la structure.

#### **II 3-2- Principe :**

Cycle thermique que subit la pièce, consistant en un chauffage entre 700° et 1000°, puis d'un maintien à température suivi d'un refroidissement lent.

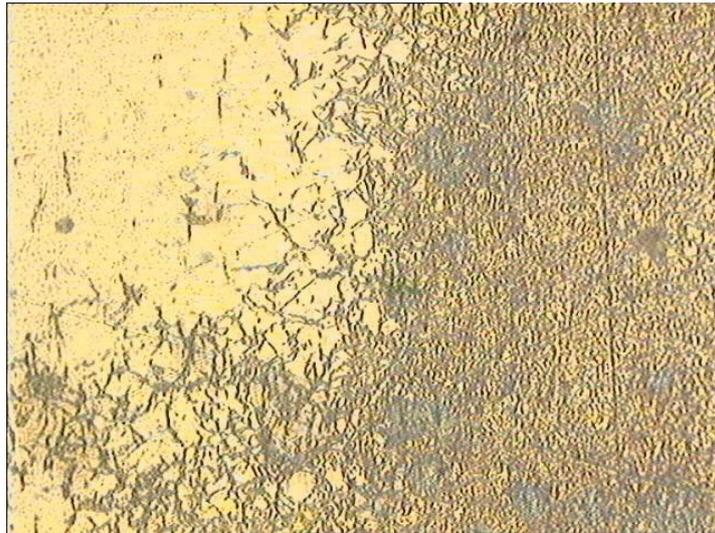
Exemple de structures observées au microscope avec un grossissement de: x 500 sur un acier C40 contenant 0,40% de Carbone.



**Etat Recuit :** on distingue des grains sombres constitués de « PERLITE » et des grains clairs constitués de

## Chapitre II : traitement thermique

---



**Etat Trempé** : on distingue des aiguilles noires sur un fond clair caractérisant la «MARTENSITE»

Dans la pratique industrielle, un recuit se définit essentiellement par deux points principaux :

- La température de chauffage.
- La durée du traitement.

En fait il ne faut pas négliger deux autres éléments d'importance qui sont :

- La vitesse de chauffage.
- La vitesse de refroidissement.

Avec toutes les précautions que ces deux facteurs englobent, en particulier lors du passage des points de transformation eutectoïdes qui doivent être l'objet de soins attentifs.

Le recuit est un traitement thermique appliqué pour obtenir un état d'équilibre thermodynamique.

Son cycle comprend les opérations suivantes :

- Chauffage à vitesse contrôlée jusqu'à une température dite de recuit (TRc), variable selon la nature du recuit.
- Maintien isotherme contrôlé à cette température. Ce temps varie selon les traitements antérieurs, le volume de la pièce et enfin des effets à réaliser.
- Refroidissement obligatoirement lent à l'air calme ou au four selon une loi programmée.

Le recuit produit certains effets qui conditionnent l'acier après traitement.

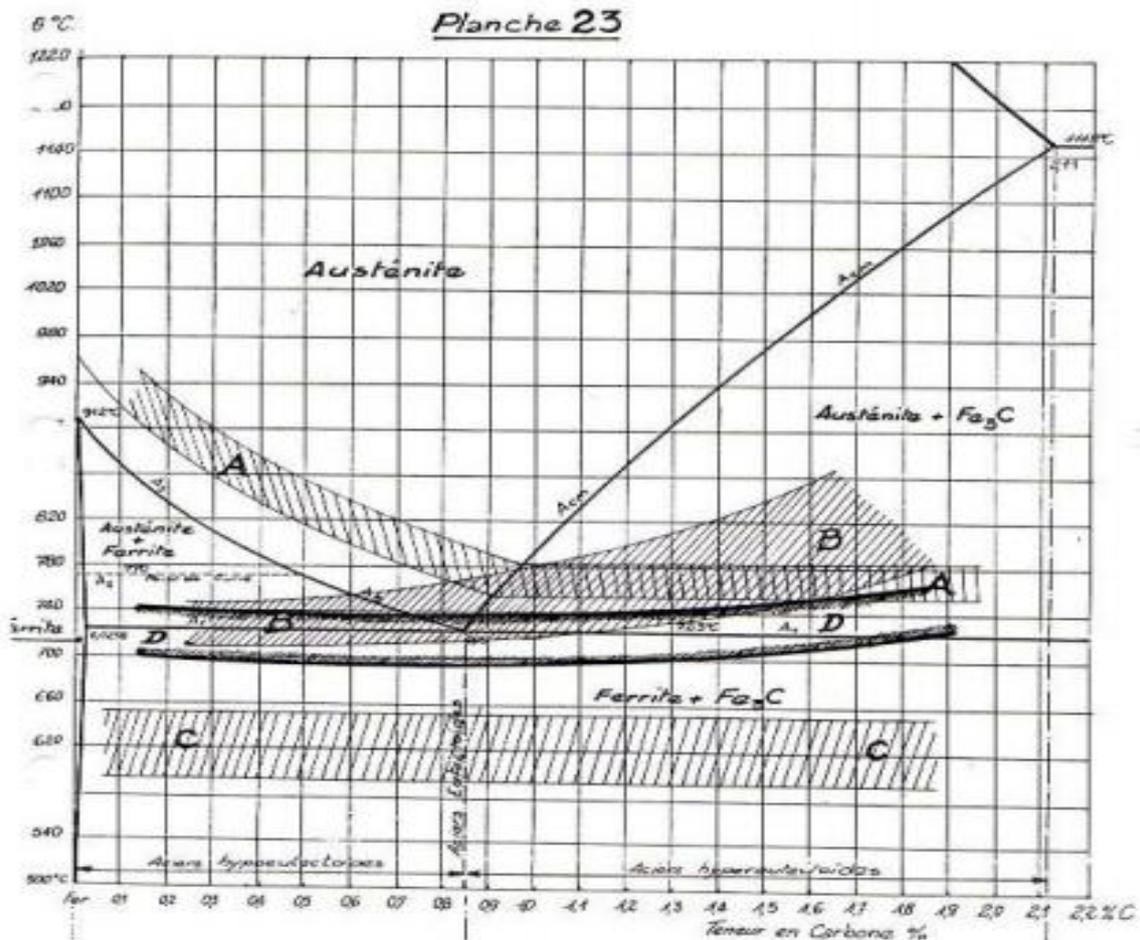
- Il élimine les effets de traitements antérieurs, soit de nature mécanique (tréfilage, laminage, forgeage...), soit de nature thermique (trempe). Autrement dit, il fait disparaître les états hors d'équilibre.

## Chapitre II : traitement thermique

---

- Il confère aux matériaux un équilibre physico-chimique, mécanique et structural de par le refroidissement lent. Ainsi, la structure obtenue est celle portée sur les diagrammes d'équilibre à la température ambiante.
- Il confère également aux matériaux de meilleurs caractéristiques de ductilité, c'est à dire il augmente au maximum les valeurs de résilience (K) (résistance au choc), l'allongement pourcent (A%) et la striction (Z), et en contre partie il diminue au minimum de leurs valeurs la résistance à la rupture (Rr), la limite élastique (Re), la dureté (H).

Il existe une classification technique des différents recuits, en fonction des objectifs visés, mais il convient de reconnaître que le gradient de température utilisé gravite autour des lignes A1 et A3 du diagramme ci-dessous, il faut convenir également qu'un certain recuit peut remédier à plusieurs défauts à la fois, donc englober plusieurs objectifs.



**Fig 67 :** Zones des températures les plus favorables pour les différents recuits

- A** : Recuits de normalisation et de recristallisation
- B** : Recuits d'adoucissement
- C** : Recuits de détente
- D** : Recuits d'homogénéisation ou de diffusion

### II-3-3- Différents types de recuit :

En pratique, on distingue quatre types élémentaires de recuits :

- Le recuit d'adoucissement
- Le recuit de normalisation
- Le recuit de détente
- Le recuit de diffusion.

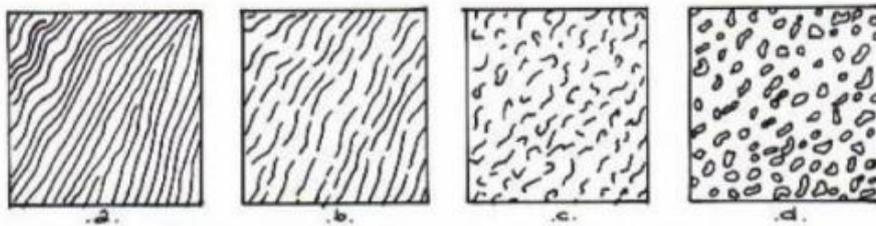
Il existe des nuances même de ces types de recuits, ce qui fait que l'on rencontrera d'autres dénominations. Ces quatre familles étant déterminées en fonction des bandes de températures qu'elles recouvrent sur le diagramme d'équilibre ( voir graphique ci-dessus ).

## Chapitre II : traitement thermique

### A) Le recuit d'adoucissement :

Ce recuit s'effectue soit sur des pièces trempées pour faciliter leur usinage ( chauffage à  $A1+80$  ) avec maintien 15 à 20 minutes, le refroidissement intervenant lentement à l'air ( ou au four ), c'est le recuit intégral, généralement, si poussé assez loin, ce recuit entraîne le retour à la structure d'origine.

Une deuxième variante de ce recuit se nomme « recuit de coalescence » conduisant à la structure globulaire des carbures dans une matrice ferritique ( voir ci-dessous ).



Ce recuit d'adoucissement par coalescence de la perlite donne un acier présentant une meilleure aptitude à la déformation par pliage, laminage à froid, estampage, et dans le cas des aciers à plus de 0.5% de carbone la meilleure usinabilité à la scie, à la fraise, au tour,...

Pour les aciers à plus faible teneur en carbone, le recuit est défavorable à ce genre d'usinage, par ce que les copeaux se détachent mal, ce qui donne des surfaces usinées rugueuses, il est préférable de conserver une structure perlitique normale (lamellaire) pour ces aciers

Cette structure n'est pas souhaitable avant trempe, car elle retarde la mise en solution de la cémentite dans l'austénite.

### B) Recuit de normalisation :

Le recuit de normalisation a pour but d'obtenir un état de référence pour l'acier avec une structure à grains fins et des propriétés mécaniques aussi intéressante que possible pour les applications les plus courantes.

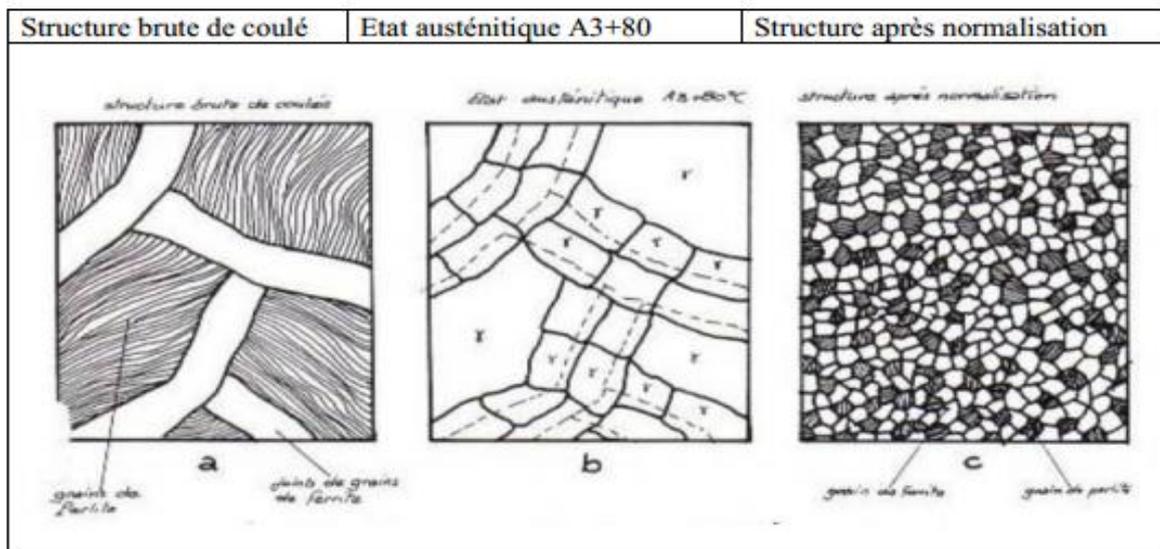
Ce traitement consiste à réaliser les opérations suivantes :

- ❖ Chauffage à vitesse contrôlée mais la plus économique possible jusqu'à une température juste au début du domaine austénitique soit  $AC3+50^\circ$  pour les aciers hypoeutectoides et  $AcCm+50^\circ$  pour les aciers hypereutectoides.
- ❖ Maintien isotherme à cette température pendant une durée relativement courte fonction des dimensions de la pièce.
- ❖ Refroidissement en général à l'air calme.

## Chapitre II : traitement thermique

Ce type de recuit est utilisé principalement pour les aciers eutectoïdes et hypoeutectoïdes. Il consiste en un chauffage au-dessus de  $A_3$  suivi d'un refroidissement à vitesse bien définie.

Ce recuit (appelé également perlitisation) a pour objectif de produire une structure perlitique à grains fins régulièrement repartis, ce qui, pour un acier perlitique, correspond aux propriétés mécaniques optimales. Par cette opération, on élimine les hétérogénéités mécaniques et cristallographiques provenant des structures brutes de coulée très grossières ou éventuellement de laminage (Voir ci-dessous).



La normalisation comprend en fait deux recristallisations :

- Transformation de la ferrite et de la perlite en austénite.
- Puis transformation, avec une répartition différente de l'austénite en perlite et ferrite. Chaque transformation entraînant une recristallisation et un affinage du grain.

Les deux allures : chauffe et refroidissement, additionnant leur effet d'affinage. Ce processus produit un nombre accru de petits grains de ferrite et de perlite.

L'affinage du grain dépend dans une large mesure des vitesses de chauffe et de refroidissement. Il ne faut pas non plus maintenir trop longtemps les pièces au-dessus de  $A_3$ , ni dépasser beaucoup  $A_3$ , cette situation entraînant dans les deux cas un gonflement du grain d'austénite, ce qui est l'opposé du but recherché. Les vitesses de chauffe et de refroidissement sont importantes, plus elles sont grandes, plus le grain est fin.

### C) Le recuit de détente :

on peut considérer le recuit de détente comme un revenu à hautes températures, en effet tous les traitements de ce groupe sont effectués à des températures inférieures à A1. Ils ont surtout pour but de supprimer les contraintes internes provenant de la solidification des pièces du refroidissement, des déformations à froid, de la mécano-soudure, et également de certains traitements thermiques.

Ces types de recuits ne sont pas uniquement destinés à l'acier mais aussi pour les fontes moulées en particulier.

Les températures sont très variables selon la nature de l'état d'origine de même que les temps de maintien. Les contraintes sont décroissantes du temps et de la température et ne disparaissent entièrement qu'au moment où la pièce atteint la température de recristallisation de la ferrite.

Cette opération visant à supprimer les contraintes résiduelles est également nommée relaxation. Ce recuit peut être effectué en plusieurs phases alternées avec des opérations d'usinage.

#### On distingue ici :

##### C-1- Recuit de régénération :

Le maintien prolongé aux hautes températures du domaine  $\gamma$  provoque une surchauffe de l'acier. Ce phénomène est observé dans un certain nombre de cas notamment après recuit d'homogénéisation, après cémentation, après forgeage à chaud, après soudage dans les zones affectées thermiquement (ZAT).

Ce problème est corrigé par un nouveau traitement destiné à affiner les grains  $\gamma$ . Il s'agit du recuit de régénération qui regroupe les conditions suivantes :

- Chauffage à une vitesse convenable jusqu'à une température légèrement supérieure à AC3 pour les aciers hypoeutectoides et légèrement supérieure à AC1 pour les hypereutectoides.
- Maintien isotherme à cette température pendant une durée relativement courte (15 à 30 mn) fonction des dimensions de la pièce.
- Refroidissement à vitesse légèrement inférieure à VCRC pour récupérer une structure ferrito-perlitique fine. La vitesse de refroidissement ne doit pas être faible au voisinage de Ar1 pour éviter le grossissement des grains de la ferrite.

La régénération des grains améliore les propriétés de ductilité de l'acier.

##### C-2- Recuit de recristallisation :

## Chapitre II : traitement thermique

---

Les pièces d'acier déformées par des traitements mécaniques de formage à chaud ou encore à froid (laminage, tréfilage, ...) concèdent des taux d'écroutissage assez importants. Le réseau cristallin est distordu (déformé) et les grains sont écrasés et orientés suivant le sens de la déformation (figure II.1). Elles ne peuvent plus subir de nouveau de traitements mécaniques de mise en forme, sinon elles éclatent.

L'élimination de cet état hors d'équilibre est réalisée en effet par le traitement de recuit de recristallisation permettant de régénérer la forme et les dimensions de ses grains ce qui remet de nouveau l'état d'équilibre.

Ce type de traitement demande à réaliser les opérations suivantes :

- Chauffage à vitesse la plus économique possible jusqu'à une température située entre 500° et 700°C en général sous atmosphère contrôlée pour éviter l'oxydation.
- Maintien isotherme à cette température pendant une durée généralement longue (48 heures par exemple).
- Refroidissement lent.

### **D) Recuit d'homogénéisation ou de diffusion :**

Les pièces coulées en acier sont soumises en général à une vitesse de refroidissement relativement rapide. Elle conduit en effet à une hétérogénéité chimique, où les éléments d'alliages ne sont pas répartis d'une façon régulière dans la structure. On est donc en présence du phénomène de ségrégation qui peut avoir une incidence négative sur les propriétés des aciers.

Le recuit d'homogénéisation est appliqué pour remédier à ce phénomène d'hétérogénéité. Il est caractérisé essentiellement par une diffusion accélérée des éléments dans la structure utilisant notamment une température élevée durant un temps prolongé. Il consiste en pratique aux opérations suivantes :

- ❖ Chauffage de la pièce avec une vitesse qui doit respecter l'état de l'acier (sa composition chimique, sa conductibilité thermique, sa forme et ses dimensions). La température du traitement doit être de son côté suffisamment élevée du domaine austénitique pour accélérer le processus de diffusion des éléments dans la structure de l'austénite. Elle est fixée à  $(A_{C3} + 200^\circ)$  et  $(A_{Cm} + 200^\circ)$  respectivement pour les aciers hypoeutectoides et les aciers hypereutectoides.
- ❖ Maintien prolongé à cette température. Le temps est calculé à l'aide des lois de la diffusion selon la nature des éléments d'alliages et les dimensions de la pièce.

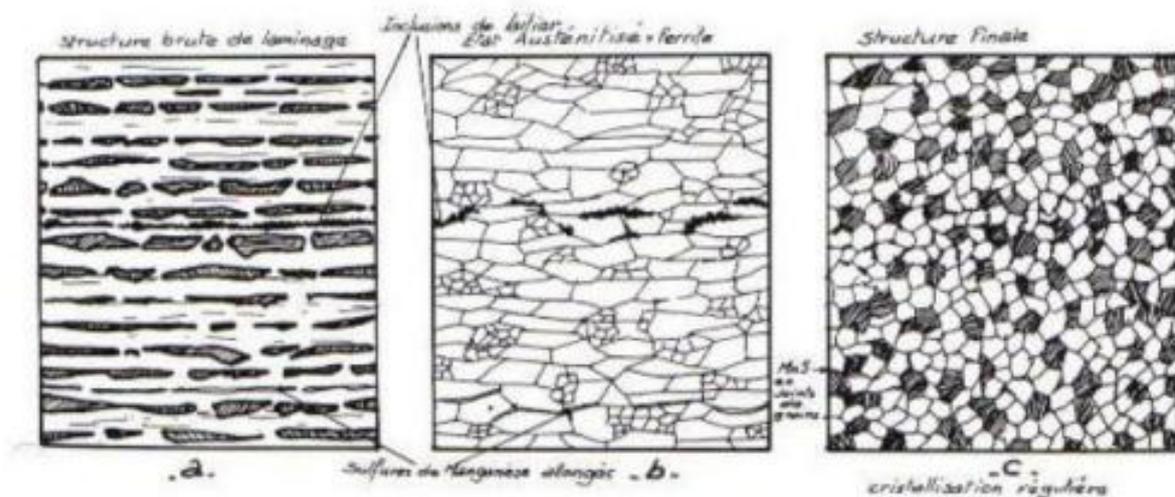
## Chapitre II : traitement thermique

### ❖ Refroidissement à vitesse lente.

A la suite de ce traitement, l'acier devient homogène mais surchauffé. Son état demande une régénération de la taille de ses grains.

On l'applique également sur des aciers laminés à chaud afin de neutraliser simultanément les hétérogénéités chimiques et mécaniques souvent, dans ce cas, le traitement se prolonge par une recristallisation provenant du maintien prolongé à températures élevées.

Une variante appliquant le même principe de diffusion, est le recuit de cémentation. Bien que l'aboutissement de la cémentation soit un phénomène de durcissement, la première phase de l'opération se fait dans les conditions de recuit sur le plan températures avec en plus la présence d'un milieu décarburant.



### III.1. Introduction

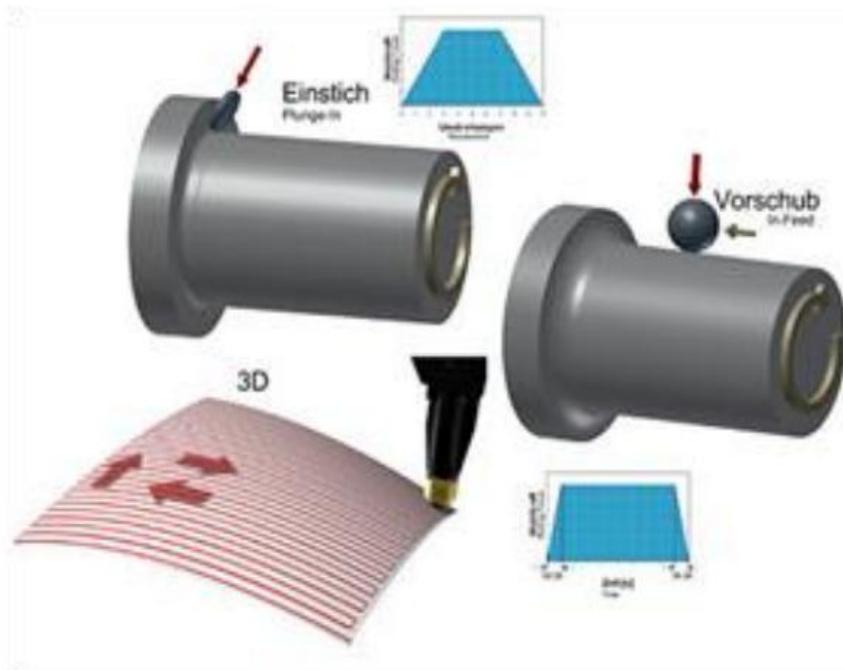
A travers une opération de mise en œuvre, on vise généralement à améliorer les aptitudes en service des pièces mécaniques, tant sur le plan résistance pendant le fonctionnement (*tenue a la fatigue, résistance a l'usure, résistance a la corrosion, .....*), que sur la qualité de précision des couches superficielles du produit [2 , 3].

Les traitements mécaniques de surface (*TMS*) [4] sont des procédés qui mettent en œuvre une déformation plastique à froid des couches superficielles. Ces procédés conduisent en général à une surface caractérisée par une faible rugosité [5,6,7], un écrouissage des couches superficielles [8,9] et des contraintes résiduelles de compression [10, 11, 12]. De ce nouvel aspect se déduit une amélioration de la plupart des propriétés mécaniques telles que ; la tenue en fatigue [13] la résistance à la 'usure....

Parmi ces traitements mécaniques de surface (*TMS*) qui consistent à bonifier les propriétés des matériaux, le brunissage est l'un des procédés qui trouve des applications de plus en plus larges dans le domaine industriel.

### III.2. Définition et principe

Le brunissage constitue un traitement de mise en œuvre à froid, il déforme plastiquement les couches superficielles [14] d'une pièce ayant subi en général un usinage préalable par enlèvement de copeaux (fig. III.1).



**Figure II.1.** Principe de fonctionnement du brunissage.

La technologie du procédé est variée selon la machine et l'outil utilisé [15, 16]. Elle réside principalement dans le fait que la force appliquée par l'outil de brunissage (fig.III.2) sur la pièce à traiter oblige les couches superficielles de celles-ci à subir une déformation plastique.

### Produces mirror-like surface finish.

Diamond Burnishing Tool



a)



b)

**Figure II.2.** Outil du brunissage .commercialisé par la firme *COGSDILL TOOL*:  
a) partie active, b) corps de l'outil.

## Chapitre III : les traitements mécaniques de surfaces

Le brunissage se fait à l'aide d'une pointe en diamant ou avec une bille en acier trempé ou en carbure métallique. Il constitue une opération simple à exécuter, vu qu'elle peut être réalisée sur des machines outils aussi bien classique (*tour, fraiseuse...*), que spéciales (*brunisseuse*).

Le procédé intéresse aussi bien les surfaces extérieures que les surfaces intérieures (fig.III.3).et peut être appliqué sur des pièces de haute dureté pouvant atteindre jusqu'à plus de *50HRC*.

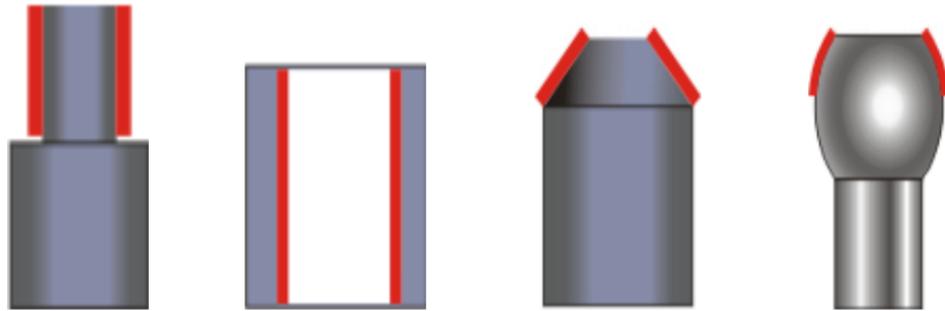


Figure III.3. Différentes surfaces à traiter par brunissage.

### III.3. Intérêt et paramètres du brunissage :

Le souci d'avoir des surfaces de qualité irréprochable conjugué à celui de la rentabilité imposent le brunissage d'une part, comme un moyen d'obtention des qualités de surfaces et des tolérances dimensionnelles assimilables à celles déduites d'un usinage de finition (*tournage dur ou rectification*). En fait, il est établi que pour un usinage classique, les frais de fabrication augmentent rapidement avec une rugosité décroissante. On peut aussi économiser non seulement les frais de fabrication pour un temps de brunissage plus court, mais aussi par les frais réduits d'outillage et de préparation des pièces ;D'autre part, le brunissage s'impose dans les gammes de fabrication à fournir un taux de consolidation aussi comparable à celui fourni par les traitements thermiques ou thermo-chimiques

Le brunissage est utilisé de plus en plus comme une opération de finition et peut se substituer aux autres techniques conventionnelles de mise en œuvre des matériaux. C'est dire en conclusion que le traitement de brunissage constitue une alternative à plusieurs procédés de fabrication par enlèvement de copeaux.

Les paramètres affectant la finition des surfaces sont variés ; bien souvent on mise sur la vitesse, l'avance ou la force], parfois d'autres facteurs sont introduits comme le nombre de passes, le rayon d'outil, la profondeur de pénétration ou l'interférence. Les réponses de sortie dépendent en grande

partie d'une combinaison spécifique des différents paramètres envisagés en fonction des outils, du matériau traité, des conditions de travail ainsi que l'état initial des couches superficielles.

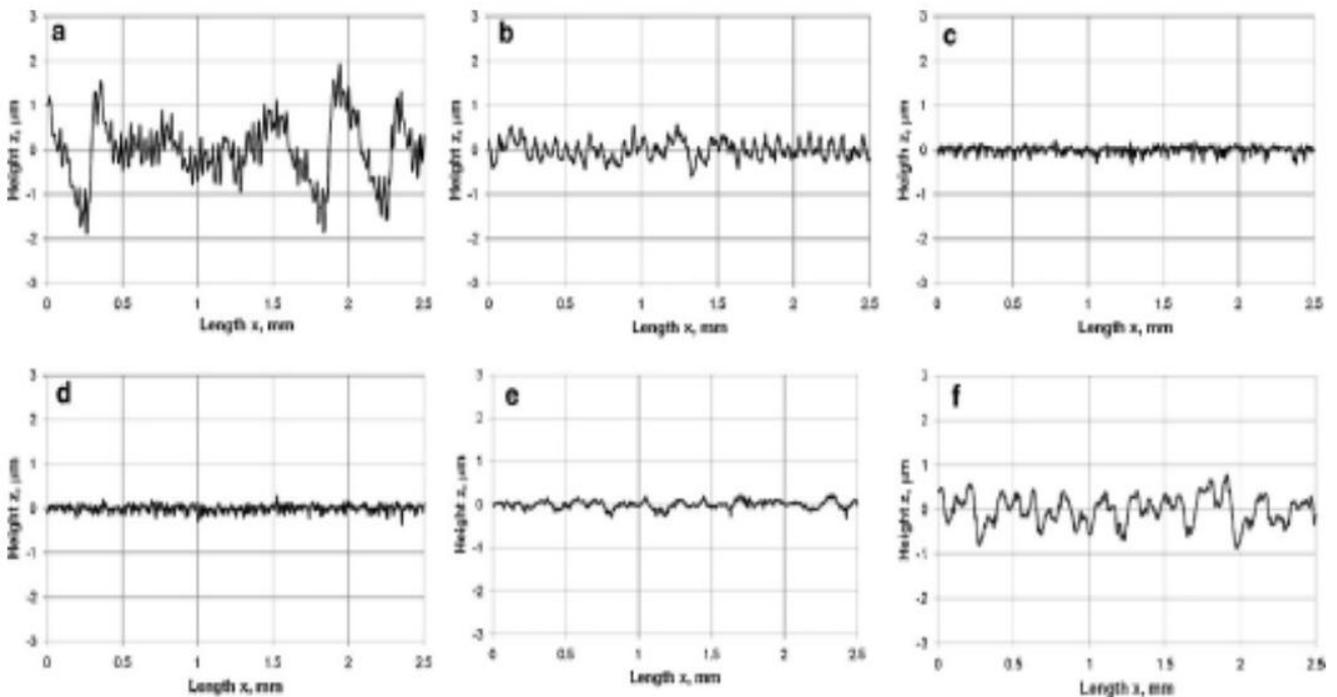
D'autres réponses de sortie ont été envisagées lors du brunissage comme l'introduction des contraintes résiduelles de compression, la résistance à l'usure ou la tenue en fatigue.

### III.4. Effets du brunissage

De la déformation plastique superficielle induite par le brunissage, résulte un lissage du profil micro-géométrique de la surface et un durcissement par écrouissage des couches superficielles. De ces effets résultent des améliorations des caractéristiques mécaniques et technologiques de nombreux alliages métalliques.

#### III.4.1. Effets sur la qualité géométrique de surface

Lors du brunissage, les crêtes des aspérités d'une surface sont amenées à fluer dans les creux de cette dernière et la surface acquiert un bel aspect micro-géométrique (fig. III.4)

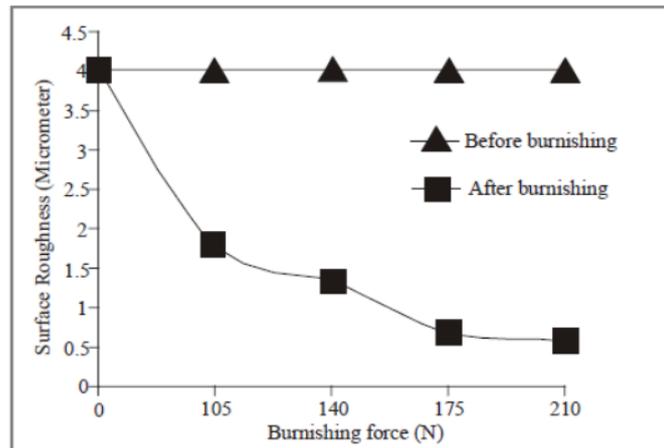


**Figure III.4.** Lissage du profil de surface par brunissage d'acier *41Cr4*, *HT-S1* (a), *HT-W1* (b), *HT-S1 + SF* (c), *HT-W2 + SF* (d), *HT-S2 + BUR* (e), and *HT-W2 + BUR* (f),

Dans le domaine industriel, le brunissage est considéré comme étant un procédé de finition et aussi comme un procédé d'usinage sans enlèvement de copeaux, c'est-à-dire un usinage à volume constant de pièce

## Chapitre III : les traitements mécaniques de surfaces

L'amélioration de la qualité de surface s'obtient en réduisant la rugosité de la couche superficielle. La surface présente des saillies qui s'aplatissent sous l'effet de la pression de repassage de l'outil. Au moyen de ce procédé de traitement, on s'efforce d'améliorer la qualité de la surface au niveau macro et micro géométrique. Par ce procédé, les rugosités  $Ra$  peuvent atteindre des valeurs de l'ordre  $0.14 \mu\text{m}$  après une rugosité initiale d'ordre  $4 \mu\text{m}$ .

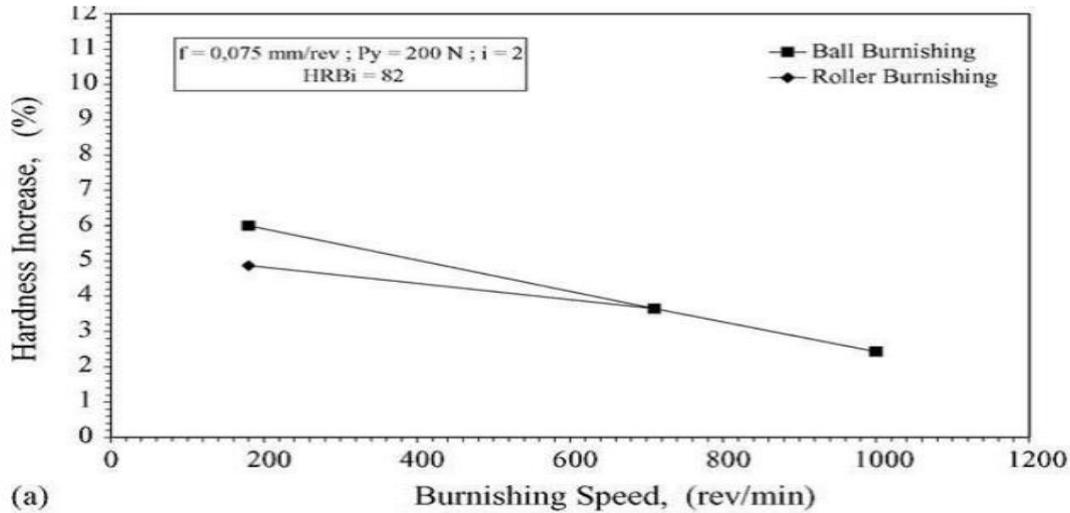


**Figure III.5.** Effet du brunissage sur la rugosité de surface.

Ces effets sont affectés par plusieurs facteurs: la vitesse, l'avance, l'effort, le rayon de la bille et le nombre de passe sont les paramètres les souvent introduits comme paramètres d'entrée. Ils ont les effets les plus significatifs sur la qualité de surface.

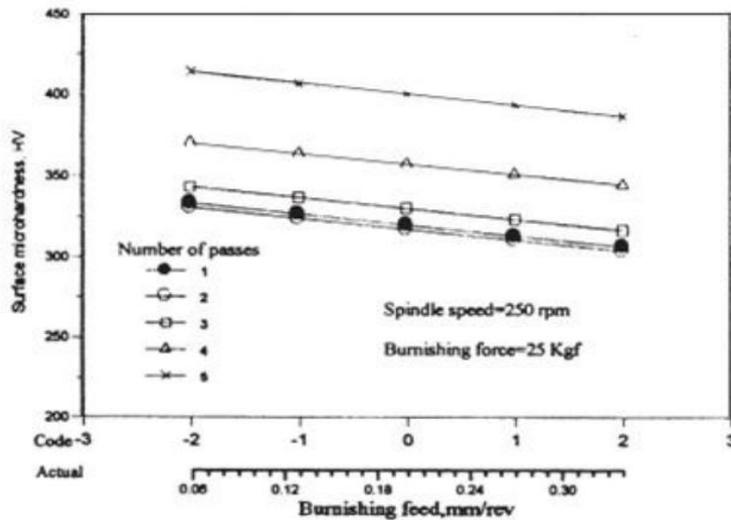
### III.4.2. Effets sur la qualité physique de surface

La majorité des travaux soulignent que le brunissage contribue à consolider davantage les couches superficielles. L'érouissage dépend du matériau, de la quantité de déformation appliquée et des conditions de déformation (*température, vitesse et mode de déformation*). Sous l'effet de l'érouissage, la dureté superficielle croît pour certains types de matériaux.



**Figure III.6.** Influence de la vitesse de brunissage sur la dureté de l'acier *RB40*

Certains auteurs expliquent qu'à faible avance, l'écoulement du métal (*acier ST37*) est plus régulier. En augmentant ce paramètre, le pas des sillons augmente, il s'en suit que l'outil ne déforme pas la matière de façon continue. En fait, si l'on considère un point de la pièce, celui-ci ne se déforme qu'une seule fois au passage de l'outil puisque la rotation de la pièce fait que le point en question ne se déforme que si l'outil est immobilisé en translation ( $f = 0$ ), on pense alors que la rapidité d'exécution ne permet pas à la déformation de se manifester judicieusement.



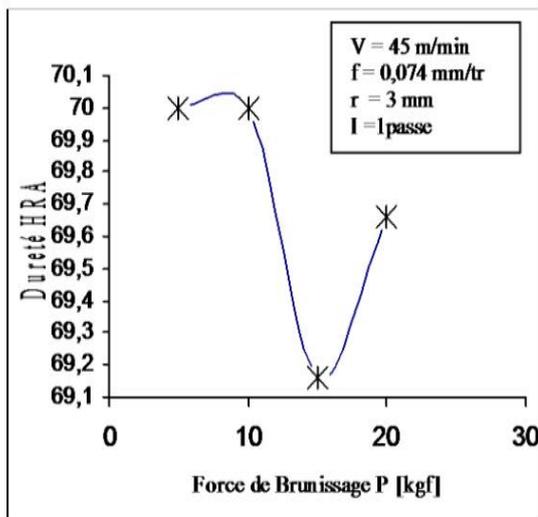
**Figure III.7.** Influence de l'avance de brunissage sur la dureté de l'acier *ST37* après brunissage pour :  $V = 250 \text{ tr/mn}$  ;  $f = 0,054 \text{ mm/tr}$  ;  $P = 25 \text{ Kgf}$  ;  $r = 3 \text{ mm}$  et  $i = 1 \div 5$  [24].

La vitesse de traitement étant liée cinématiquement à l'avance par la chaîne cinématique de la machine-outil, c'est pourquoi son effet est le même que celui de l'avance.

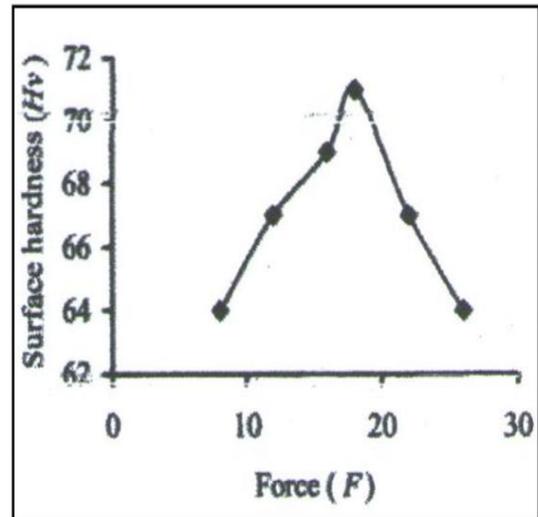
## Chapitre III : les traitements mécaniques de surfaces

La force de brunissage est un des facteurs les plus importants qui gouvernent les effets du brunissage. L'importance de la surface déformée et le taux d'érouissage en dépendent fortement de ce paramètre. La microdureté augmente avec la force de brunissage. Plus la force est grande plus importantes sont les déformations et plus intense est l'érouissage superficiel. Ceci aura par conséquent un accroissement de la microdureté .

Cette augmentation est d'autant plus poussée que les paramètres  $v$ ,  $f$ ,  $r$  sont à leurs faibles niveaux et que l'outil présente un grand rayon. Toutefois en poussant ce paramètre au-delà de  $10 \text{ kgf}$  sur l'acier  $35\text{NC}6$  , on risque un écaillage et une microfissuration de la surface. En traitant de l'aluminium ( $\text{AISI } 1045$ ), *U.M shirast et al*, ont remarqué que la dureté superficielle diminue au delà de  $18 \text{ kgf}$ .



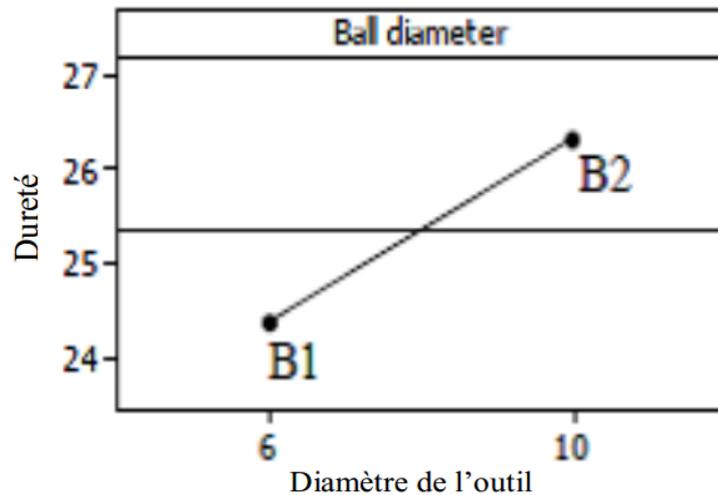
a)



b)

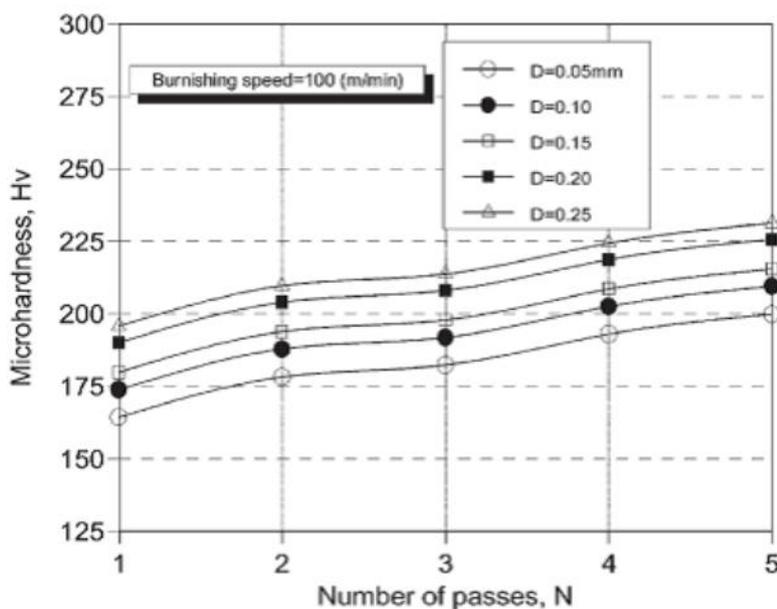
**Figure III.8.** Influence de l'effort de brunissage sur la dureté : a) acier  $35\text{NC}6$  ; b) aluminium ( $\text{AISI } 1045$ )

Lorsque le rayon de l'outil est important, la surface de contact entre l'outil et la pièce le devient aussi. La pression hertzienne sera alors importante ; il s'en suit une déformation plastique plus accrue et par conséquent une augmentation de la microdureté. La figure III.8 montre que la dureté superficielle de l'acier  $4140$  augmente avec l'augmentation du diamètre de la bille de l'outil de brunissage .



**Figure III.9.** Influence de rayon de l'outil sur la dureté [71].

Les faibles valeurs du nombre de passes provoquent un faible écoulement plastique de la matière en surface qui a pour conséquence un faible écrouissage qui se traduit par un faible durcissement des couches superficielles. Avec l'augmentation de ce paramètre, *El-Khabeery et al* ont remarqué une amélioration de la dureté pouvant atteindre 26% lors de l'application du brunissage sur l'alliage d'aluminium 6061-T6

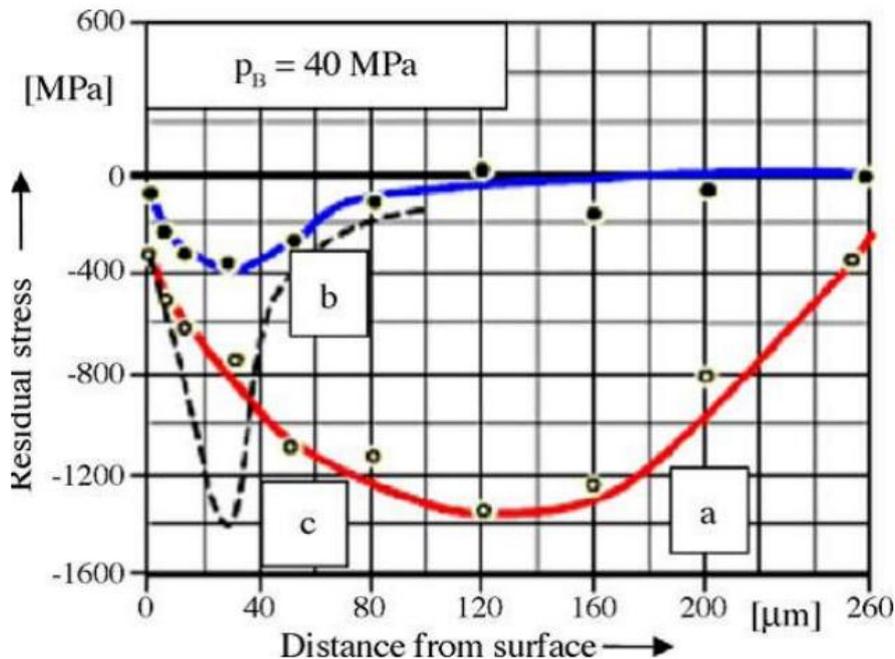


**Figure III.10.** Influence de nombre de passe de brunissage sur la dureté (l'alliage d'aluminium 6061-T6)

### III.4.3. Effets sur la qualité mécanique de surface :

Tout procédé de fabrication introduit dans une pièce mécanique des contraintes résiduelles qui vont influencer son comportement en fatigue, en rupture et même en corrosion. Le brunissage fait partie d'une gamme de traitements mécaniques dont le rôle est d'introduire des contraintes résiduelles de compression. Grâce à ce champ de contraintes résiduelles favorables pour décharger les couches superficielles d'une pièce mécanique, les performances sont nettement améliorées. Cette action peut être assimilée à un béton précontraint. C'est pour cette raison que les traitements de surface mécaniques sont souvent considérés comme un traitement de précontrainte.

*P. Zhang et al* ont remarqué que l'apparition des les contraintes résiduelles de compression se manifestent sur une faible profondeur pour une surface tournée. La profondeur affectée par le grenailage peut atteindre jusqu'à  $30 \mu\text{m}$ , alors que pour le cas du brunissage, les contraintes résiduelles de compression sont observées jusqu'à une profondeur d'environ  $120 \mu\text{m}$  par rapport à la surface.

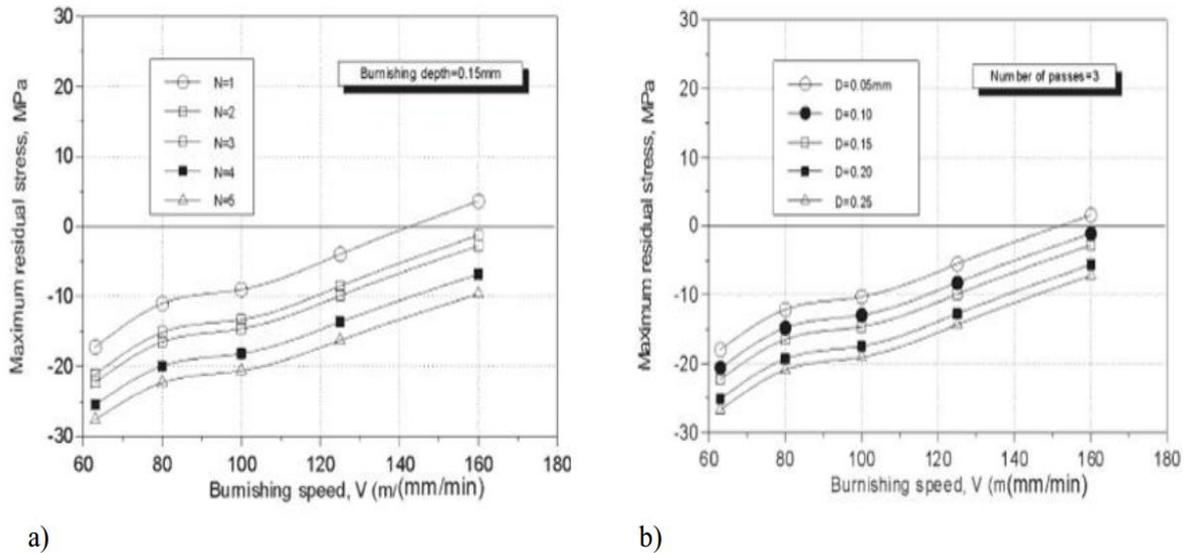


**Figure III.11.** Contraintes résiduelles obtenues sur une pièce forgée à froid: a) état de brunissage, b) état de tournage, c) état de grenailage

Généralement les contraintes résiduelles, obtenues par le brunissage, dépendent du matériau traité. Certains travaux ont fait remarquer que le maximum des contraintes résiduelles obtenu sur les

## Chapitre III : les traitements mécaniques de surfaces

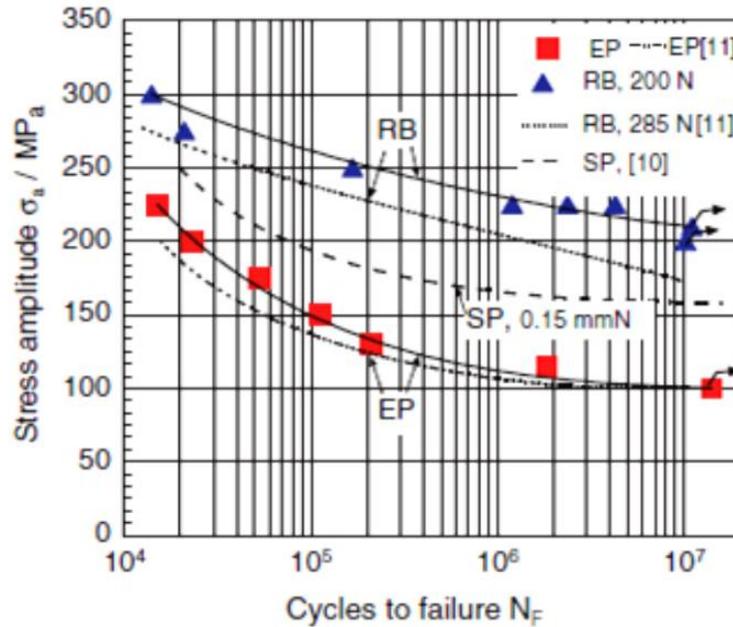
pièces traitées en alliage d'aluminium *6061-T6* est situé en surface. Ce maximum est proportionnel à la vitesse appliquée, au nombre de passes et à la profondeur de pénétration



**Figure III.12.** Evolution des contraintes résiduelles avec la vitesse sur pièces en *6061-T6* traitée par brunissage : a) en fonction du nombre de passe, b) en fonction de la profondeur de pénétration.

Comme dans les autres traitements de surface mécaniques, l'introduction des contraintes résiduelles de compression engendre une augmentation de la résistance à la fatigue.

Un écrouissage superficiel et donc une augmentation de la dureté avec une rugosité particulière qui élimine ainsi les défauts de surface telles que les stries d'usinage contribuent à l'amélioration de la limite de fatigue. Puisque les fissures de fatigue s'amorcent à la surface du matériau, il en découle que l'état de cette surface exerce une influence importante sur la courbe d'endurance. La figure III.13 illustre graphiquement l'influence de l'état de surface sur l'endurance d'un alliage de magnésium *AZ80*.



**Figure III.13** Courbe de Wöhler d'alliage de magnésium AZ80 Pour différent traitements [74]: EP= electrolytical polishing, RB=Roller burnishing, SP=Shot peening.

L'auteur a constaté que le brunissage ou le grenailage de précontrainte améliorent la résistance à la fatigue de l'alliage de magnésium AZ80 par rapport à l'usinage conventionnel. Pour le brunissage, cette amélioration est de 75%. Puisque ce matériau est plus sensible à la déformation plastique avec le brunissage qu'avec le grenailage de précontrainte, les valeurs de la dureté mesurées auparavant après le brunissage sont des valeurs très importantes. L'augmentation de la microdureté après le brunissage est de 80 à 100%, alors que l'augmentation apportée par le grenailage de précontrainte est seulement de 30 à 50%.

### III.5. Conclusion

Le brunissage est un traitement mécanique superficiel à froid. Les effets positifs de ce procédé sont liés au lissage des aspérités et à l'écrouissage des couches superficielles. Ces effets sont affectés par plusieurs facteurs. Les facteurs  $V$ ,  $f$ ,  $P$ ,  $r$  et  $i$  ont les effets les plus significatifs aussi bien sur la rugosité que sur la dureté. Par ailleurs, le brunissage permet la conversion des contraintes résiduelles de traction en contraintes de compression ayant un effet positif sur la nucléation et la propagation des fissures. Tous ces effets conduisent en général à l'amélioration de la tenue à l'usure et à la fatigue.

## Chapitre IV : Matériaux et techniques expérimentales

### IV.1. Identification du matériau:

La nuance (35NC6) représente un acier faiblement allié au Nickel Chrome, à haute résistance mécanique, et à ténacité élevée, il est utilisé dans la construction mécanique pour les pièces devant subir un grande fatigue comme les pièces mobiles et flottantes : arbre pignons, manchons, broches, etc...

Le matériau a été livré à l'état brut de laminage, la composition chimique est reportée dans le tableau 1:

*Tableau 1. Composition chimique de l'acier 35 NC6*

<b>Elément</b>	<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cu</b>
%	0.36	0.57	0.20	0.012	0.013	0.151
<b>Elément</b>	<b>Al</b>	<b>Ti</b>	<b>Ni</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>V</b>
%	0.026	0.003	1.576	1.582	0.250	0.003

### IV.2. Caractéristiques mécaniques :

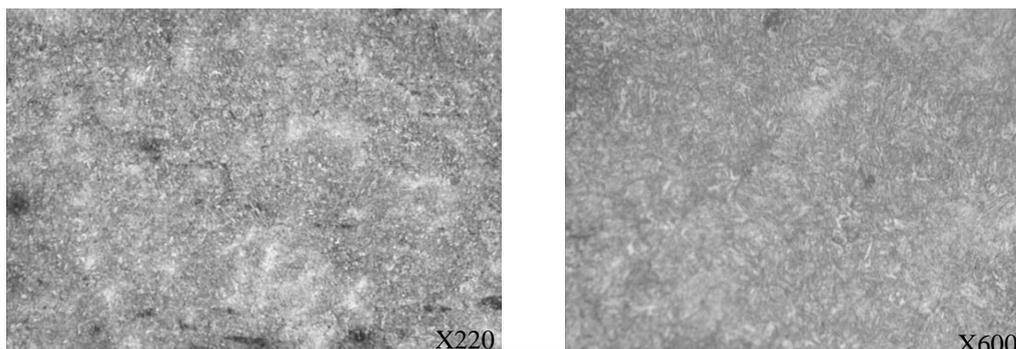
Les caractéristiques mécaniques moyennes obtenues par des essais de traction sont reportées dans le tableau 2 aussi bien pour l'état d'usinage que l'état de brunissage

**Tableau 2. Caractéristiques mécaniques de l'acier 35NC6**

Traitement	S <sub>0</sub> (mm <sup>2</sup> )	Module (kN/mm <sup>2</sup> )	Rp <sub>0.2</sub> (MPa)	Rm (MPa)	Rp <sub>0.2</sub> /Rm %	ε <sub>rup</sub> %	A%
Usinage Epr.8	314,16	10,80	900,35	1015,33	88,68	26,41	17
Brunissage Epr.7	314,16	9,73	895,99	1035,65	86,52	29,08	18

### IV.3. Microstructure :

La microstructure a été mise en évidence au moyen d'une attaque chimique au réactif de Nital (Alcool+NHO<sub>3</sub>) pendant 5 à 10 seconds. Le réactif est appliqué sur des échantillons préalablement polis aux papiers 700 à 100. La finition a lieu au moyen de la pâte diamantée étalée sur un drap. Une observation au microscope optique a révélé la microstructure du matériau (figure 1).



Cette microstructure est composée essentiellement de grains de ferrite et perlite, par contre le mélange de chrome et de nickel dans 35NC6 se forme de carbure soit  $(Cr_{23}C_6)$  ou

$(Cr_7C_3Hc)$ .

### **IV.4 Etude métallographique :**

L'étude métallographique est un moyen de contrôler essentiellement la structure micrographique des matériaux métalliques.

Toute étude de matériaux métalliques passe presque toujours par l'étude des constituants micrographiques. Ce sont eux qui donnent aux métaux leurs différentes caractéristiques mécaniques. Toutes les étapes de la vie d'un matériau sont concernées par leur mise au point, leur utilisation et leur détérioration par usure.

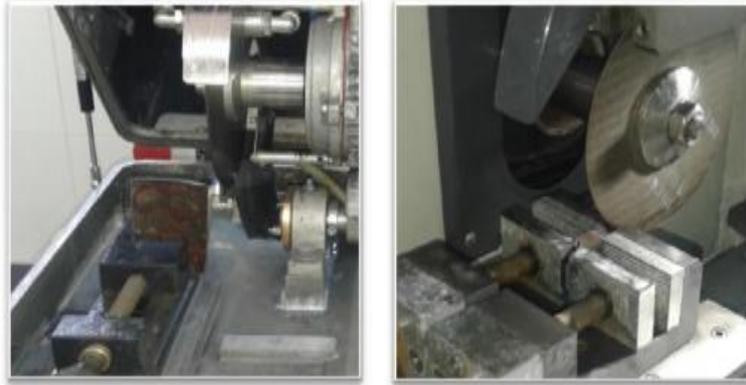
#### **IV.4.1. Préparation des échantillons :**

La préparation des échantillons pour l'observation micrographique nécessite un polissage mécanique. Celui-ci consiste en une série de polissage au papier émeri de granulométrie de plus en plus fine pour terminer avec un tissu recouvert de pâte diamantée (à chaque fois suivis de nettoyage à l'eau à la fin de chaque étape de polissage pour enlever les plus grosses particules qui pourraient griffer la surface). Tous les échantillons expérimentés sont attaqués au nital à 4%.

##### **A. le découpage :**

Pour le découpage on a utilisé une macro tronçonneuse pour préparer les échantillons ;

Le découpage se fait à la présence de l'eau pour éviter l'augmentation de la température (a cause de frottement entre le disque abrasive et l'échantillon) donc par conséquence on évite le changement de la structure.



**Figure VI.2** l'opération de découpage

### **B. l'enrobage à froid :**

On fait l'enrobage pour faciliter le polissage des échantillons et pour assurer seulement le contact de surface de métal avec la solution dans le cas des électrodes de corrosion, et pour cela on utilise une résine avec un durcisseur.

### **C. le polissage :**

L'opération de polissage a été effectuée avec des papiers abrasifs de différentes granulométries : 120, 320, 400, 600, 800, 1000, 2000, 4000.



**Figure VI.3** L'opération de polissage

### **IV.5. Essai de dureté :**

La dureté d'un matériau est une propriété mécanique représentant la résistance à la pénétration d'un indenteur dont la forme dépend du procédé d'indentation choisi. Pendant l'essai de dureté, il se forme une empreinte d'indentation entourée d'une zone déformée plastiquement. Plus la dureté est élevée, plus l'empreinte et la zone déformée sont réduites. La déformation plastique est le résultat de microdéformations intervenantes à l'échelle de la maille cristalline à partir des défauts microstructuraux comme les précipités, les atomes en insertion ou en substitution et les dislocations. Cet essai sert à mesurer la dureté d'un métal en tenant compte de la profondeur à laquelle une pointe pénètre dans le métal lorsqu'on applique une charge donnée.

Les essais de dureté peuvent être réalisés à l'aide de plusieurs appareils de mesure. La principale différence entre les divers essais réside dans la forme de la pointe.

### **IV.6. Traitement thermique :**

Pour améliorer la structure cristallines et augmenter la dureté de l'acier nous avons procédé a la Tremp des éprouvettes en chauffant a la température de 850°C, Pui refroidir dans l'huile froide.

## Chapitre V : résultats

### V.1 – COURBE CONVENTIONNELLE DE TRACTION :

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques de l'acier 35NC6 : Epr.8 usiné et Epr.7 traité mécaniquement par brunissage.

Traitement	$S_0$ (mm <sup>2</sup> )	Module (kN/mm <sup>2</sup> )	$R_{p0.2}$ (MPa)	$R_m$ (MPa)	$R_{p0.2}/R_m$ %	$\epsilon_{rup}$ %	A%
Usinage Epr.8	314,16	10,80	900,35	1015,33	88,68	26,41	17
Brunissage Epr.7	314,16	9,73	895,99	1035,65	86,52	29,08	18

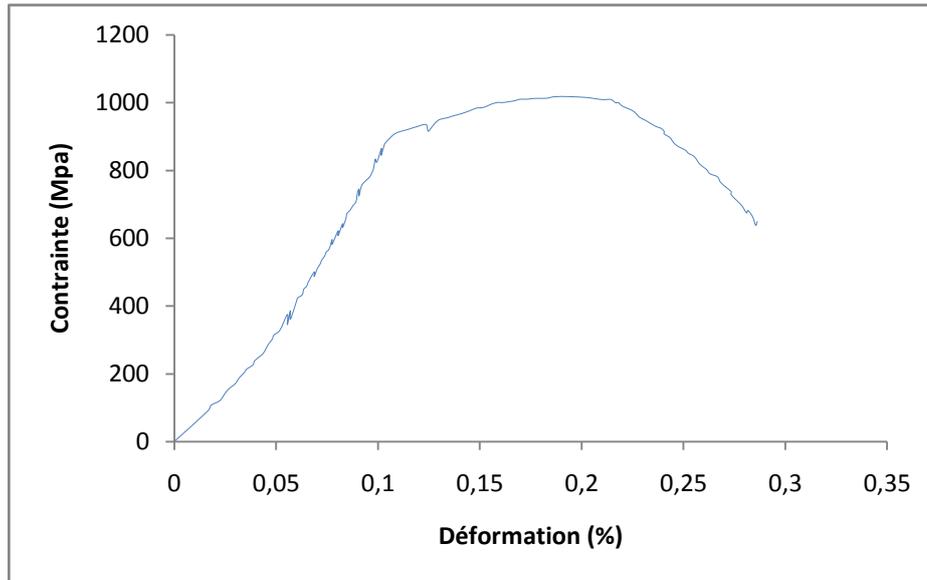


FIGURE.V. 1 : Courbe conventionnelle de traction (Epr. 8 usinage)

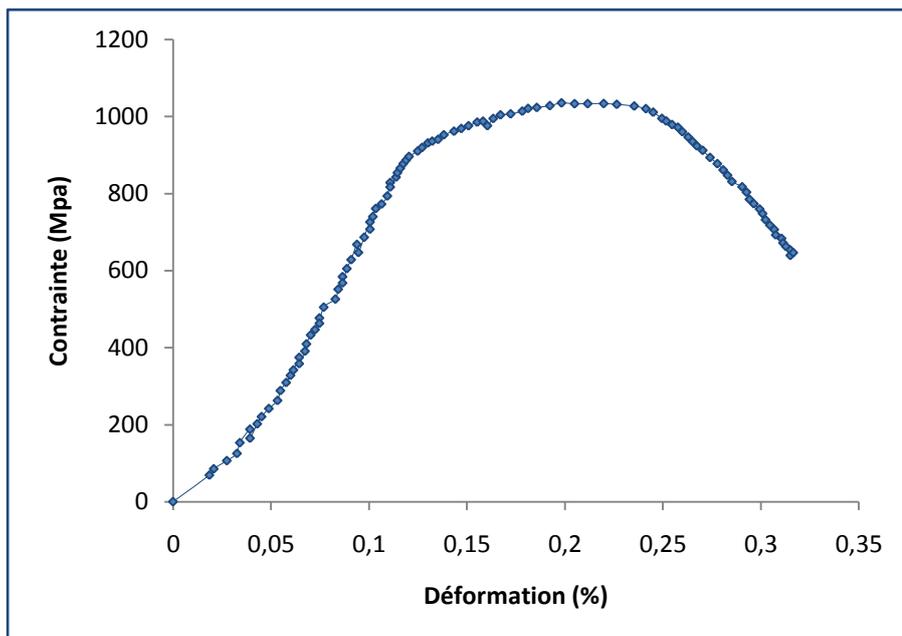
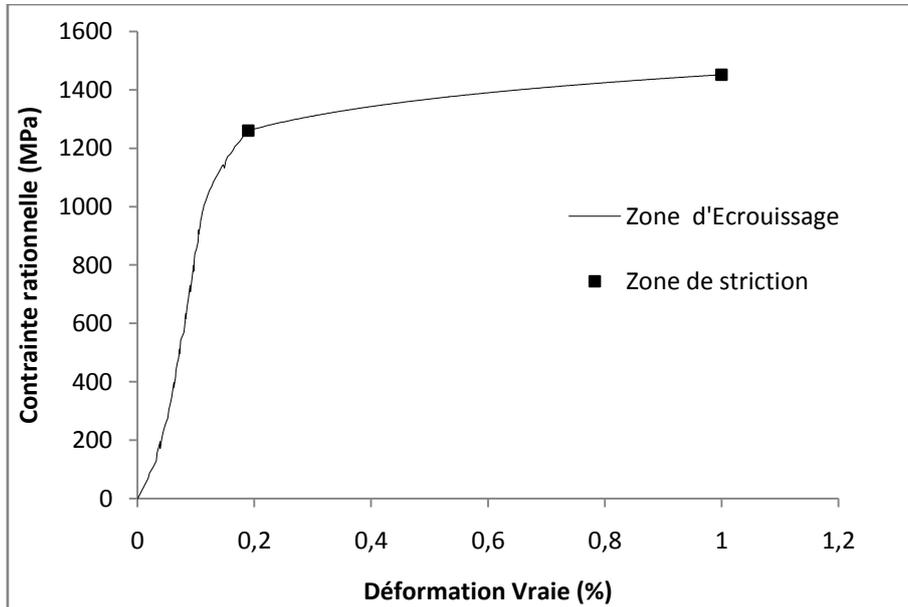


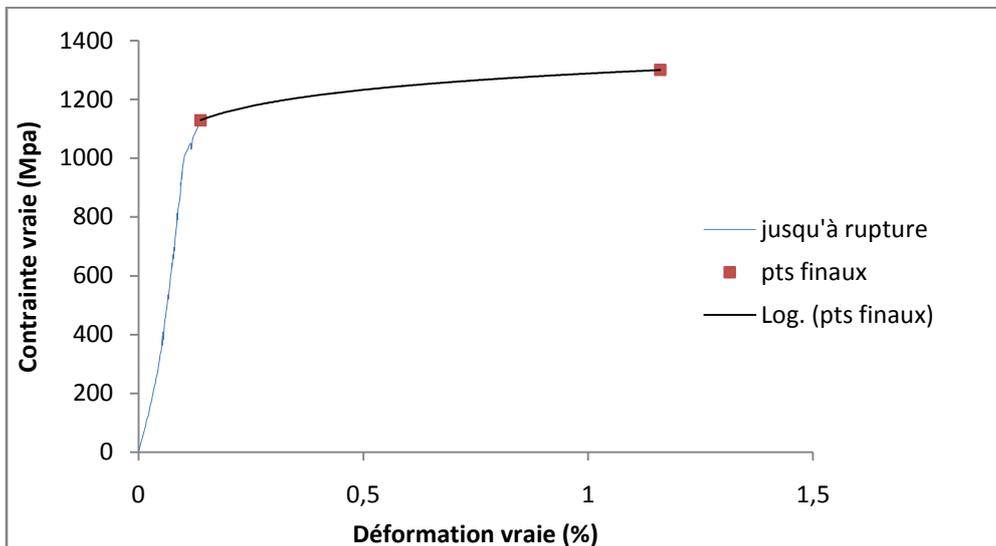
FIGURE.V. 2 : Courbe de traction conventionnelle (Epr.7 brunissage)

## V.2 – COURBE RATIONNELLE DE TRACTION :

Les résultats montrant de la courbe corrigée sont représentés graphiquement sur la figure V. 3.



**FIGURE .V.3** Courbe rationnelle de traction (ép. 7 brunissage)



**FIGURE.V. 4** : Courbe rationnelle de traction (ep8 usinage)

## Chapitre V : résultats

Je ressort de l'analyse des résultats que le brunissage est un traitement de surface qui modifie les propriétés de base du matériau suite aux déformations plastiques des couches superficielles.

À l'issue de ses déformations, le matériau subit un phénomène d'écrouissage qui même si la limite élastique ne connaît pas une augmentation, l'on remarque que le procédé améliore la résistance à la rupture, et réduit l'allongement à rupture aussi l'aire développée sous la courbe devient importante sous l'effet du brunissage. L'énergie absorbée avant rupture est plus importante. C'est donc que le matériau devient plus tenace.

### V.3. EVALUATIONS DU COEFFICIENT D'ECROUISSAGE:

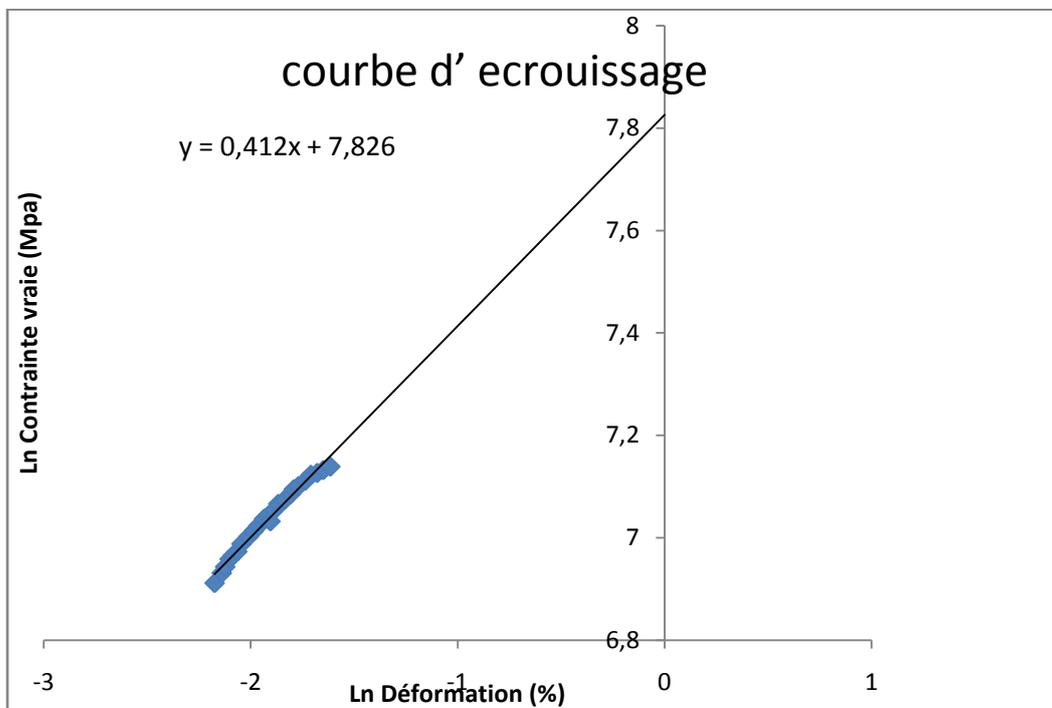
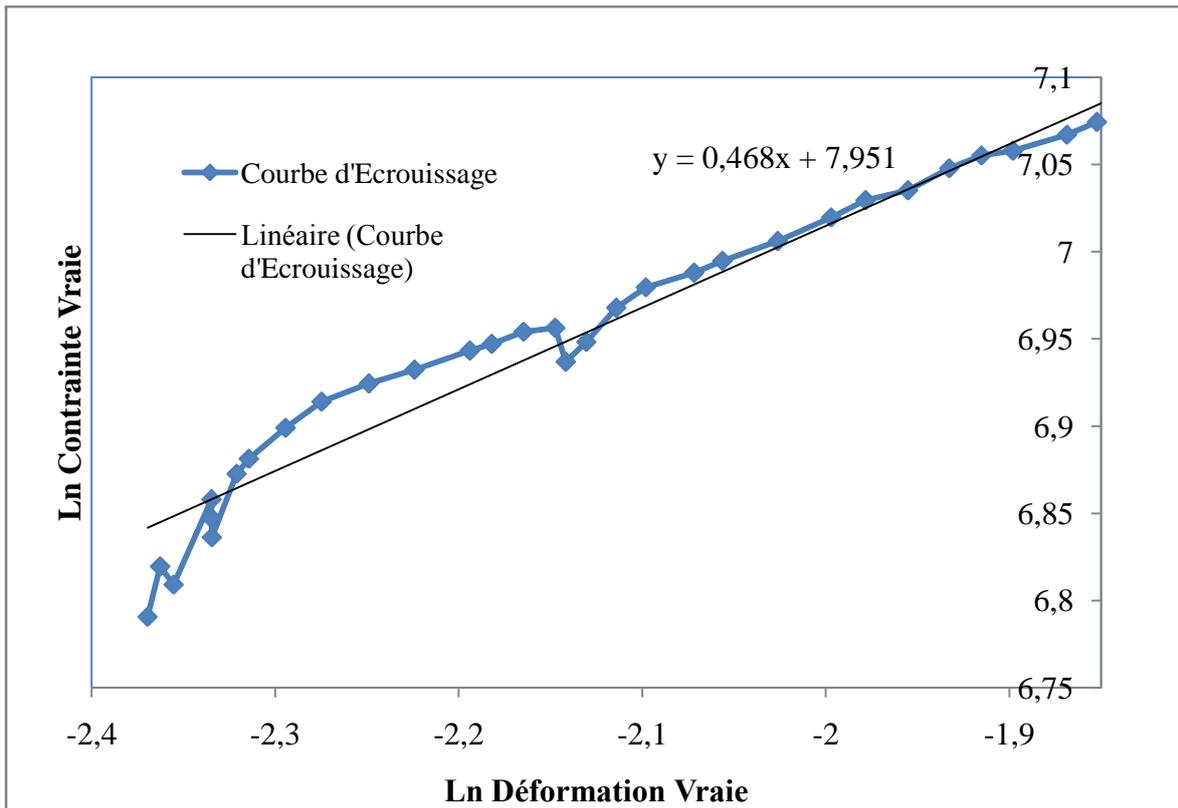
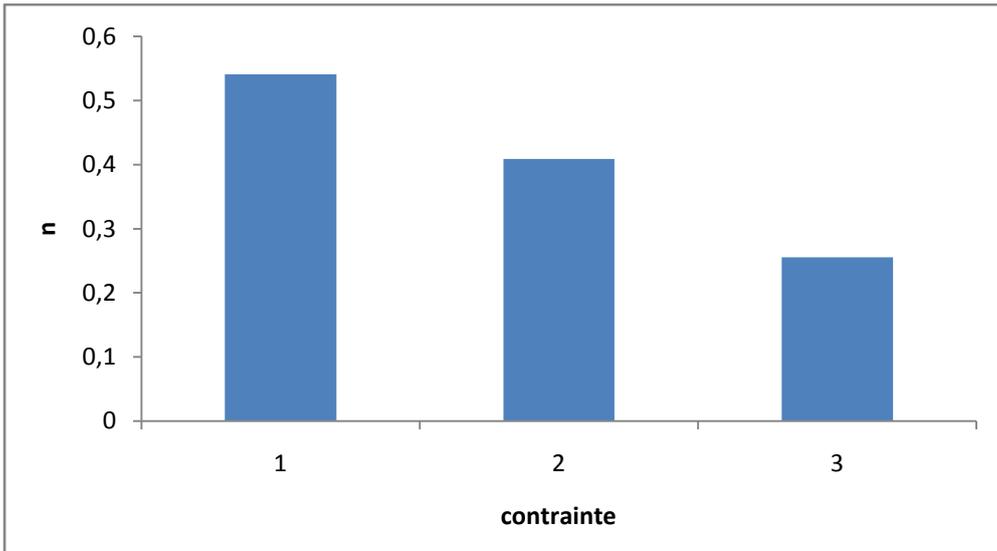


FIGURE .V.5 : Courbe d'écrouissage (ép. 7 brunissage).

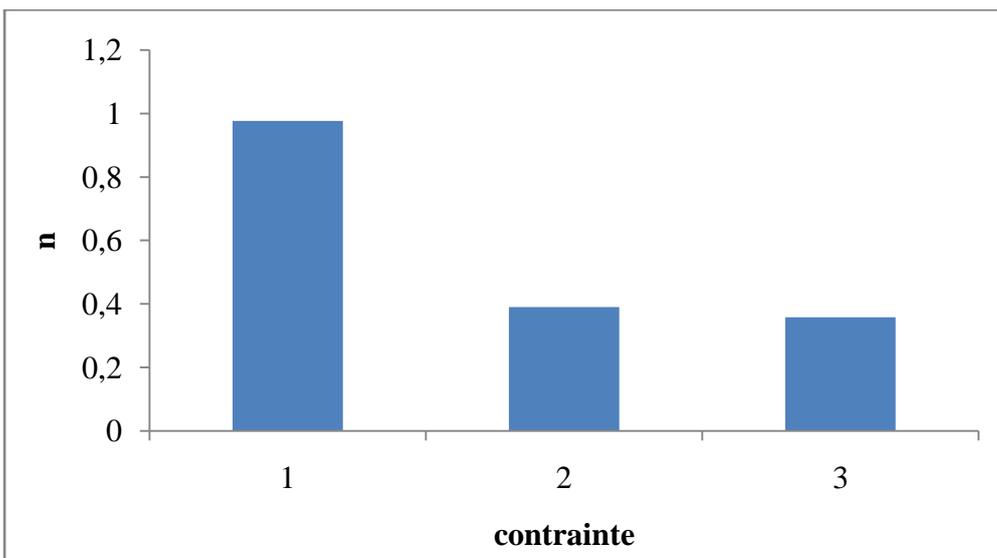


**FIGURE V.6 : Courbe d'écroutissement (ép. 8 usinage)**

D'après la fig( 6 et 7 ) le coefficient d 'ecrouissage devient important mais perd de son efficacité au fur et a mesure que la contrainte augmente jusqu 'à atteindre la résistance à la rupture ou le matériau commence à développer une striction.

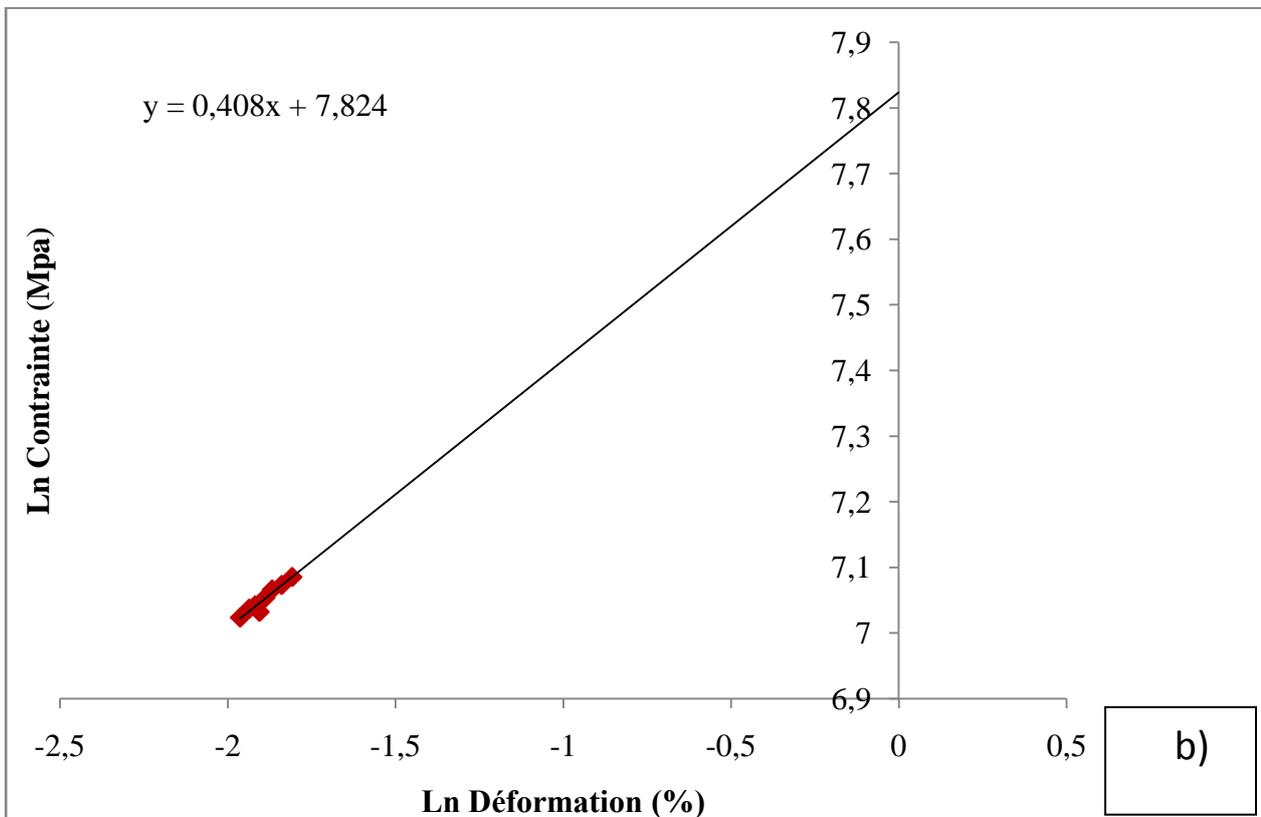
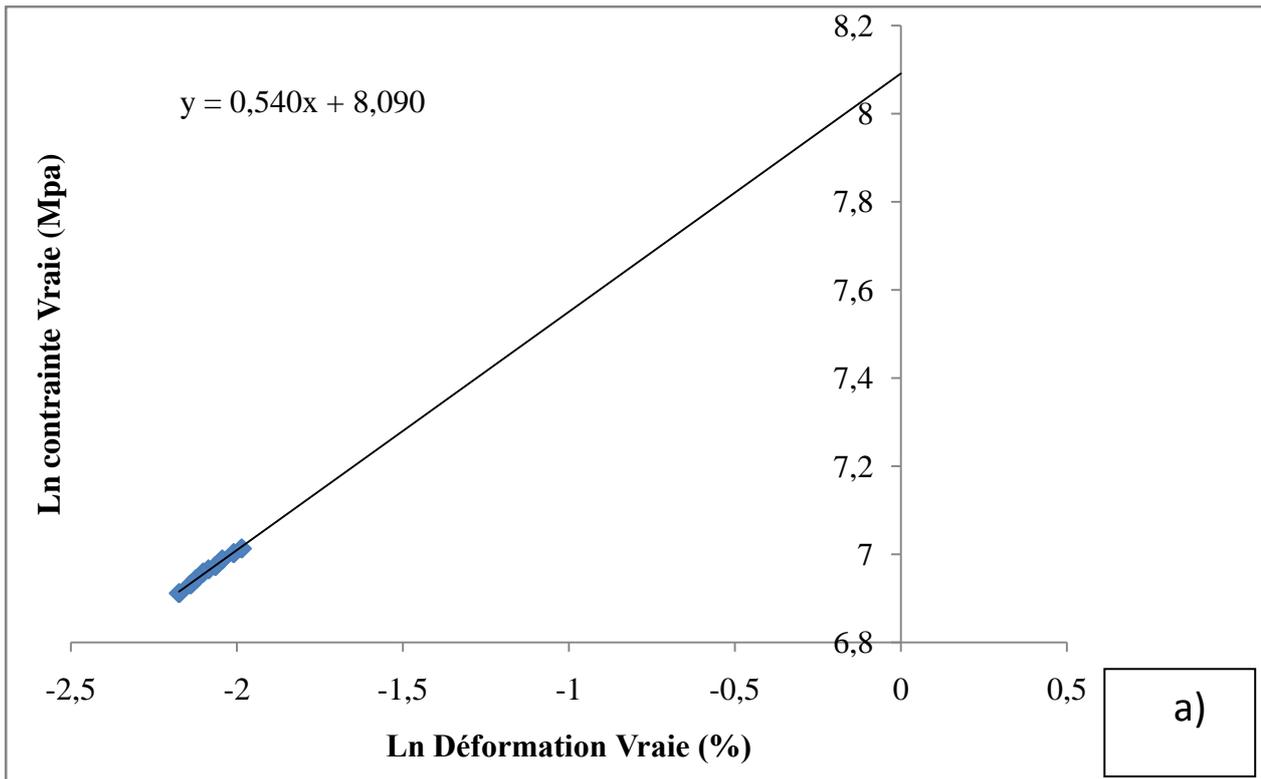


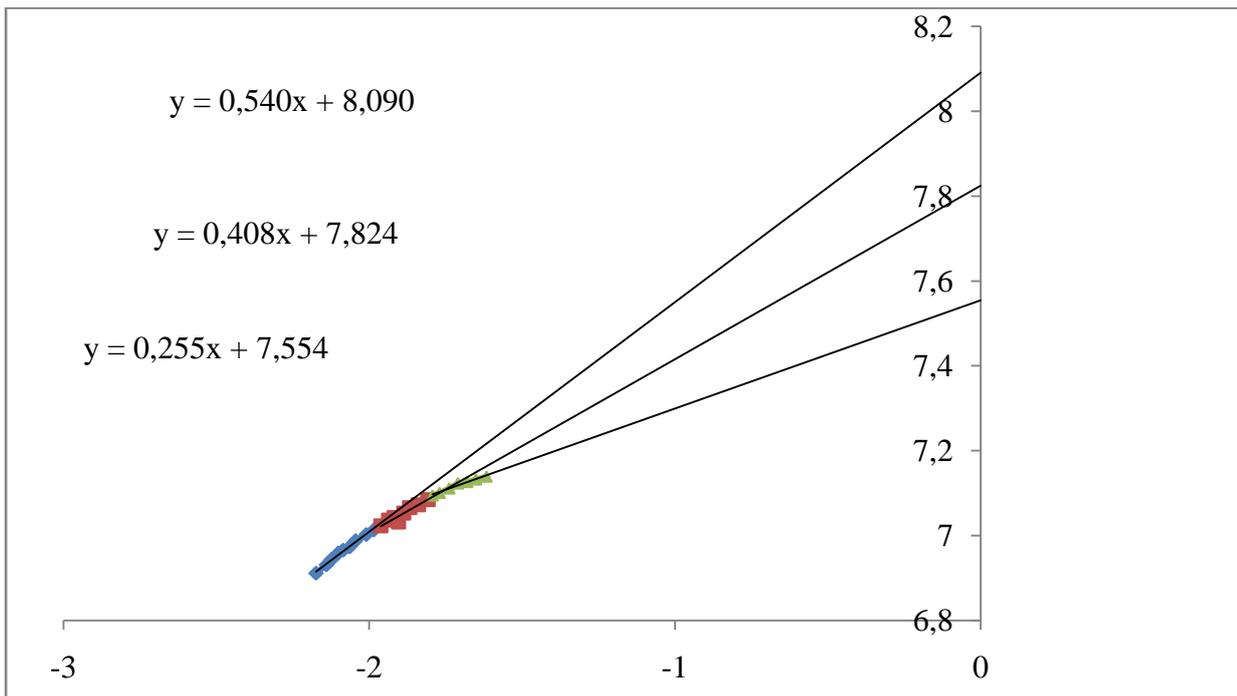
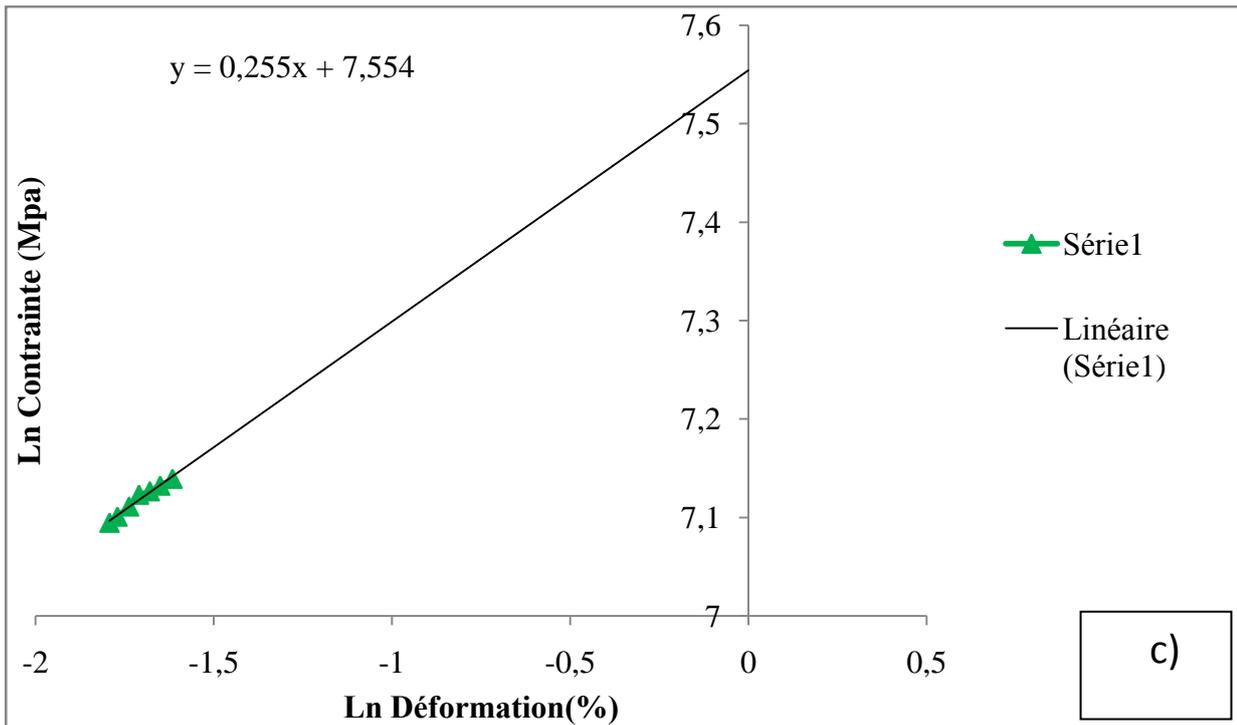
**FIGURE V.7 :** Diagramme  $n=f(\sigma)$  ( ep7)



**FIGUREV.8:**  $n=f(\sigma)$  (ep8)

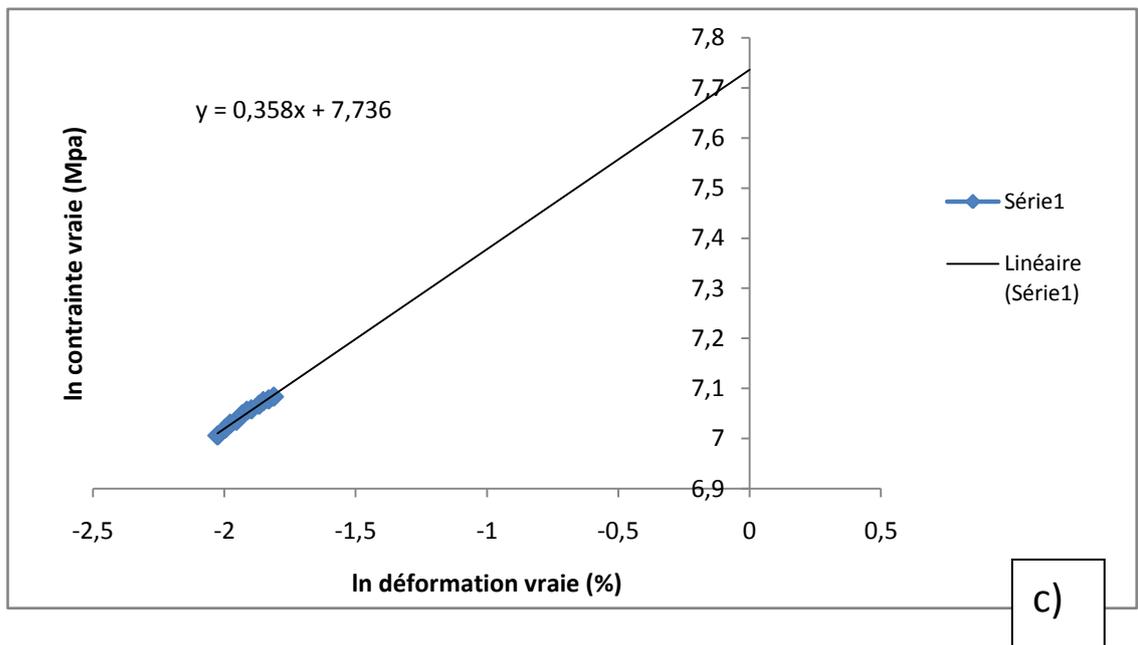
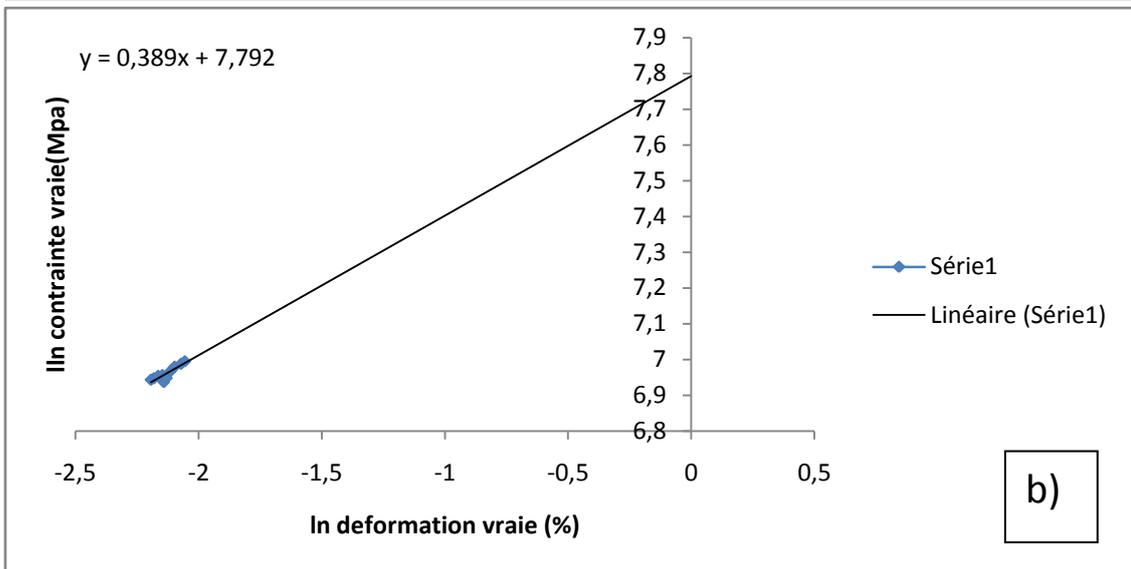
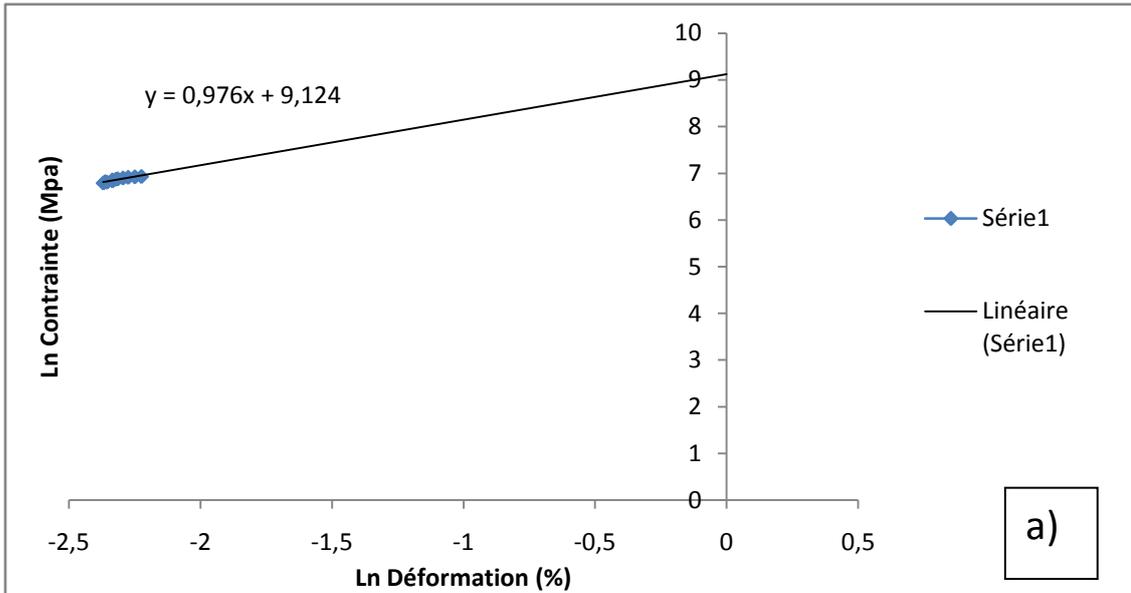
## Chapitre V : résultats

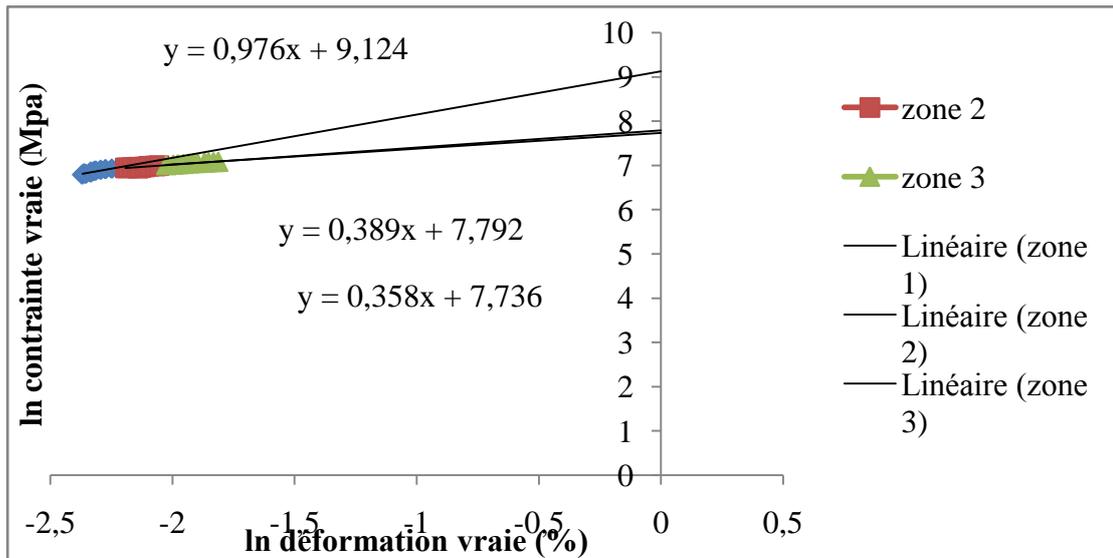




**Figure V.9.** Coefficient d'érouissage de l'acier 35NC6 : éprouvette 7 traités mécaniquement par brunissage. a) zone 1, b) zone 2, c) zone 3

# Chapitre V : résultats

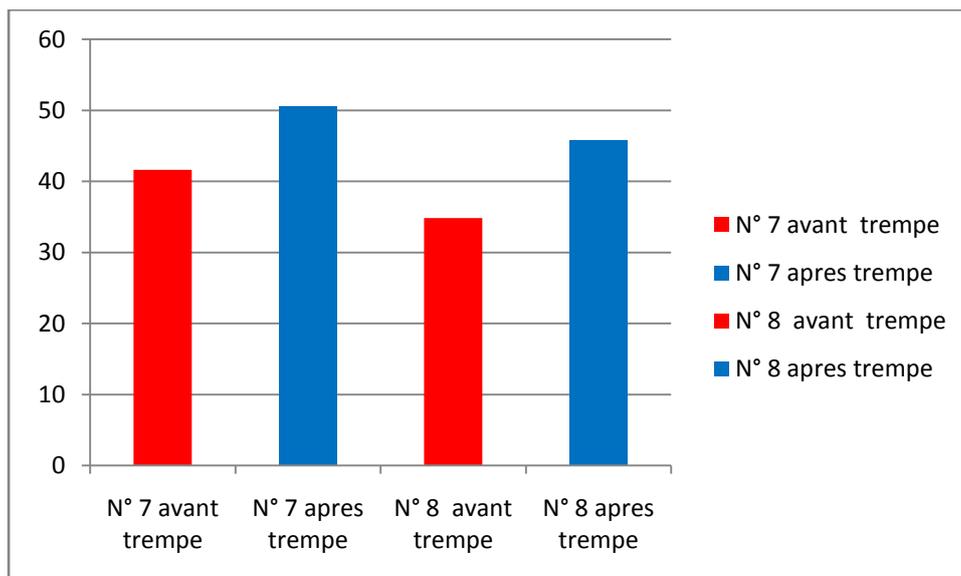




**Figure V.6.** Coefficient d'érouissage de l'acier 35NC6 : éprouvette 8 usiné.  
 a) zone 1, b) zone 2, c) zone 3

**MESURE DE DURETE :**

N° 7 avant trempe	<b>41,6</b>
N° 7 après trempe	<b>50,6</b>
N° 8 avant trempe	<b>34,84</b>
N° 8 après trempe	<b>45,77</b>



## Chapitre V : résultats

---

A l'état d'usinage la dureté du matériau était de 34.84 HRC lorsque le matériau subit un traitement thermique de trempe la dureté a augmenté jusqu'à 45.77 HRC.

Cependant à l'état du brunissage la dureté était de 41.6 HRC. après trempe la dureté a augmenté jusqu'à Si le matériau traité par brunissage sera soumis à une trempe à 850°C et refroidi à l'huile il gagnera d'avantage en dureté ; jusqu'à 50.6 HRC.

### 5.3. Evaluation du coefficient d'érouissage :

Le coefficient d'érouissage caractérise la déformation rationnelle répartie (homogène) que peut subir un matériau et l'aptitude à répartir uniformément cette déformation.

A cet effet seul le domaine d'érouissage a été pris en considération. Le coefficient d'érouissage est obtenu par linéarisation des courbes rationnelles en les traçant dans les coordonnées logarithmiques. La pente de la courbe donne directement la valeur de ce coefficient. Le coefficient directeur de la pente peut être évalué par linéarisation à partir d'une courbe de tendance linéaire dont l'équation permet de déduire le coefficient  $k$  et de remonter à la relation de Ludwüik.

Dans les coordonnées logarithmiques la relation de Ludwüik s'écrit :

$$\ln(\sigma_v) = \ln(\sigma_0) + \ln[k(\epsilon_r)^n] = \ln(\sigma_0) + \ln(k) + n \ln(\epsilon_r)$$

Cette équation étant du type  $y = ax + b$ , on définit  $k$  tel que  $k = e^b$

A cet effet l'équation de la courbe d'érouissage (relation de Ludwüik) peut être évaluée comme suit :

$$\text{Etat d'usinage : } \sigma_{vu} = \sigma_0 + 2109,34 (\epsilon_r)^{0.312}$$

$$\text{Etat de Brunissage : } \sigma_{vb} = \sigma_0 + 2576,82 (\epsilon_r)^{0.407}$$