

### 3-3. Notion de trempabilité

#### 3-3.1. Généralités

#### 3-3.2. Détermination de la trempabilité

#### 3-3.3. Etat mécanique après trempe

La trempée idéale doit conduire à de la martensite à l'exclusion de la ferrite, perlite et bainite

Le diagramme TRC permet de se rendre compte de la possibilité qu'offre l'acier pour atteindre cette condition

#### 3-3.1. Généralités

Trempabilité de l'acier 35NCD16 supérieure à celle de l'acier 42C4

#### Trempabilité

Aptitude à se transformer par refroidissement rapide en constituants formés à basse température (martensite) et d'éviter la formation de ferrite, perlite et bainite

Trempabilité en fonction des besoins

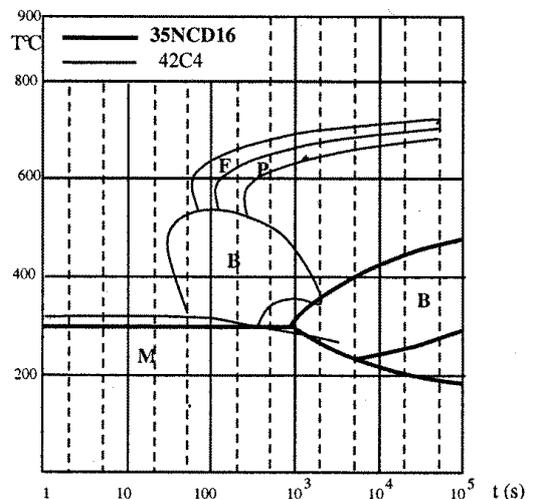
La trempabilité a un prix, celui des éléments d'alliages qui peuvent multiplier par un facteur 20, 50 et 100, l'élaboration d'une pièce

#### Pièce sollicitée en traction

Nécessité d'avoir des propriétés mécaniques uniformes de la surface au centre impose une grande trempabilité

#### Pièce sollicitée en flexion

Faible sollicitation de la fibre neutre n'impose pas une grande trempabilité



⇒ Facteurs influençant la trempabilité

La composition chimique  
 La pureté  
 Les conditions d'austénitisation  
 La grosseur des grains

Approche quantitative

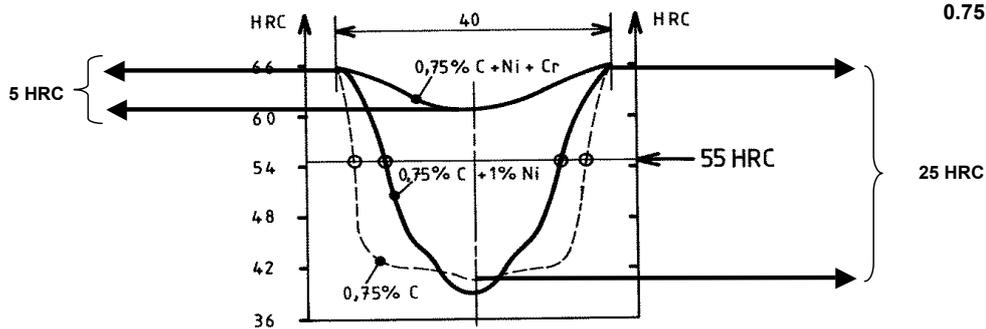
Lors de la trempé d'une pièce, les vitesses de refroidissement varient d'un point à un autre

Pour un milieu de trempé et une dimension de pièce donnés, la différence de trempabilité entre diverses nuances se traduit par une différence de pénétration de trempé

Quantification : mesure de dureté en fonction de la position dans la pièce (courbes en U obtenus sur des cylindres)

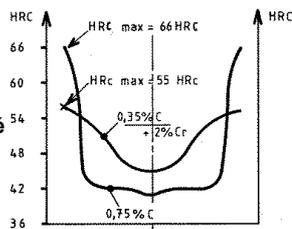
Traitements thermiques - Trempabilité

Courbes de pénétration de trempé

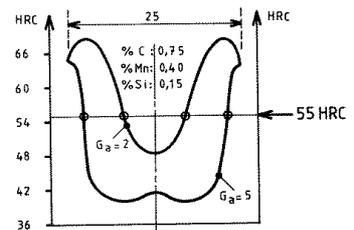


Influence de l'addition de Ni et Cr dans un acier à 0.75% C

Ne pas confondre dureté et trempabilité



Augmentation de  $G_a$  améliore la trempabilité mais dégrade les propriétés mécaniques



Traitements thermiques - Trempabilité

### 3-3.2. Détermination de la trempabilité

⇒ Utilisation des courbes TRC

Vitesse critique de tremp

Vitesse minimale de refroidissement évitant la formation de perlite et bainite

En pratique, vitesse moyenne  $V_c^{300/700} = 400 / \Delta t^{300/700}$

Plus  $V_c$  est faible ou  $\Delta t$  élevé, plus la trempabilité est forte

Evaluation

$V_c^{300/700} = 400 / 50 = 8^\circ\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$       Trempabilité moyenne

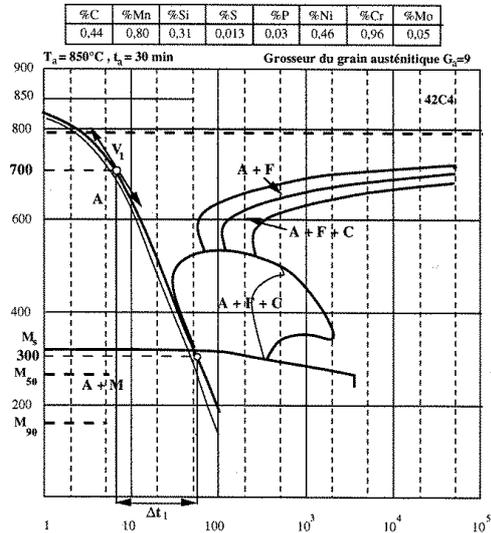
Classification

Faible trempabilité : vitesse de l'ordre de quelques centaines °C/s. Trempe à l'eau

Trempabilité moyenne : quelques dizaines °C/s. Trempe à l'huile

Trempabilité élevée : quelques dixièmes °C/s. Trempe à l'air, 'autotrepants'

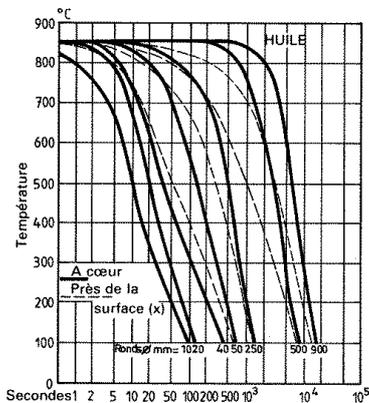
Acier 42Cr4



Traitements thermiques - Trempabilité

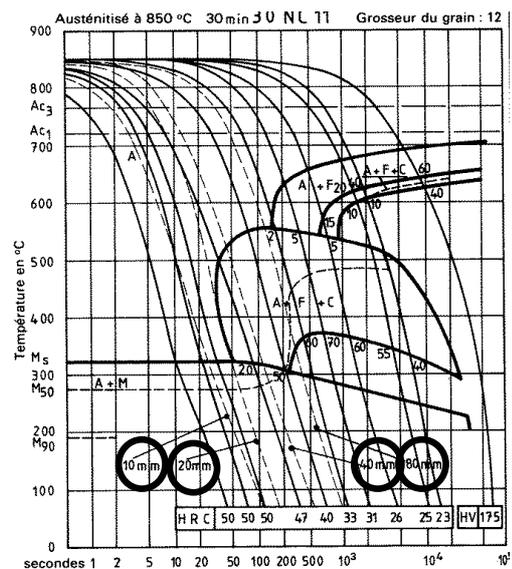
⇒ Application : tremp de pièces rondes

Courbes de refroidissement établies pour des formes et milieux déterminés, et tracées dans les mêmes coordonnées que les courbes TRC



Tremp à l'huile pour des ronds de divers diamètres (IRSID)

Superposition au diagramme TRC



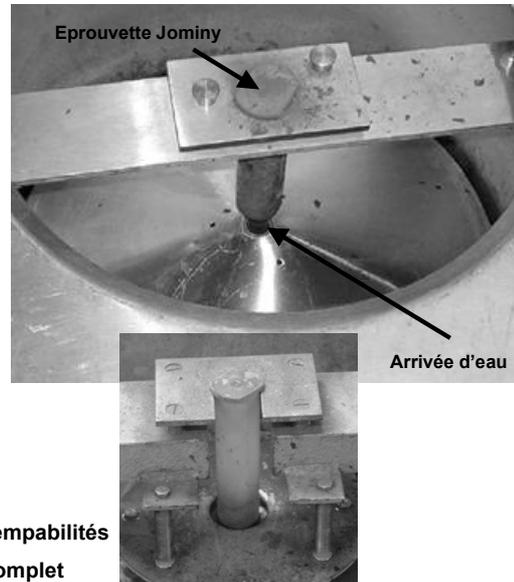
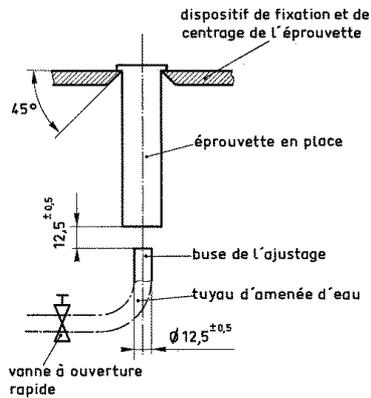
Rond Ø 10 mm HRC=50, 100%M ----- Rond Ø 20 mm HRC=50, 100%M  
Rond Ø 40 mm HRC=45, 20%B-80%M ---- Rond Ø 80 mm HRC=37, 60%B-40%M

Traitements thermiques - Trempabilité

Une seule opération pour plusieurs lois de refroidissement

⇒ Essai Jominy

Austénitisation d'un barreau cylindrique 100 mm \* 25 mm  
Trempe en bout par un jet d'eau vertical (hauteur libre 65 mm)

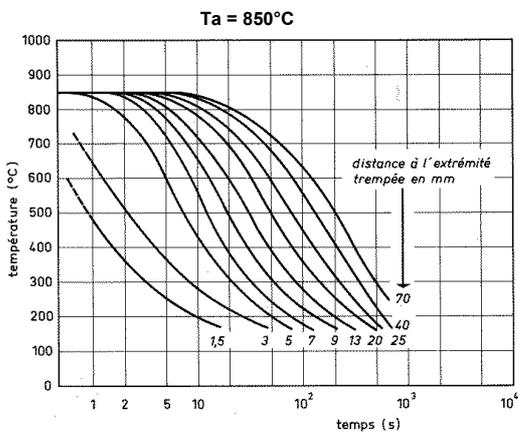


Méthode non applicable aux aciers de très faible et très forte trempabilité  
Essai Jominy plus simple que le diagramme TRC mais moins complet

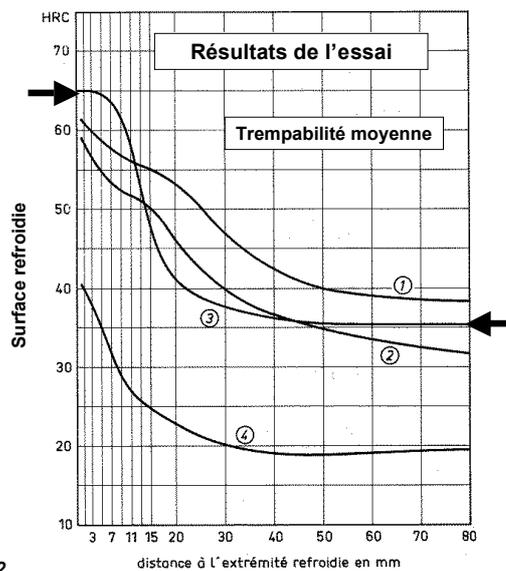
Traitements thermiques - Trempabilité

Courbes de refroidissement des points au niveau desquels sont effectuées les mesures de dureté

⇒ Essai Jominy



Acier 1 : 50CrMo4    Acier 2 : 35CrMo4  
Acier 3 : 100CrMo7    Acier 4 : 10NiCrMo12



Traitements thermiques - Trempabilité

### 3-3.3. Etat mécanique après trempe

#### Contraintes résiduelles

Trempe optimise les propriétés mécaniques du matériau mais il faut prendre en compte l'hétérogénéité des phénomènes métallurgiques et thermiques

Champ de contraintes résiduelles

Formation de fissures (tapures de trempe)

#### 1/ Contraintes thermiques

Répartition non uniforme de la température (transfert thermique) entre le coeur et la surface de la pièce (dilatation non identique en tout point, transformation de l'austénite à des temps différents)

#### 2/ Contraintes de transformation

Différence de volume et de propriétés des phases (retrait et transformations allotropiques)

- déformations plastiques si la déformation imposée est supérieure à la déformation élastique que peut accepter le métal, c'est-à-dire si sa limite d'élasticité est faible ;
- déformations élastiques (et donc contraintes) lorsque l'acier a une limite d'élasticité assez élevée. Si géométrie susceptible d'engendrer des concentrations de contraintes (variations brutales de section, trous, entailles...) et lorsque ces déformations élastiques sont fortes, une fissuration peut apparaître (tapure de trempe).

### transformations au revenu

#### 4-1. But et principe du revenu

#### 4-2. Transformations métallurgiques au cours du revenu

#### 4-3. Evolution des propriétés mécaniques au cours du revenu

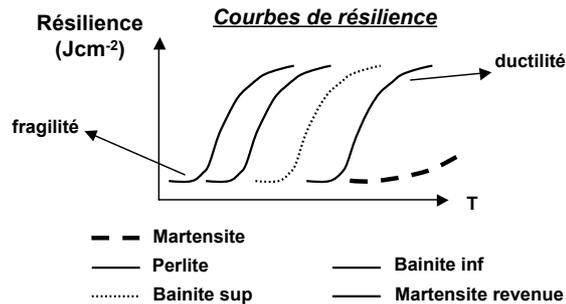
## 4-1. But et principe du revenu

⇒ Pratique industrielle

Les traitements thermiques appliqués pour obtenir les caractéristiques souhaitées, comportent deux étapes :

- le durcissement par trempe
- le revenu, qui est un chauffage au dessous de  $A_{c1}$

La trempe conduit à des propriétés de résistance élevées du fait de la présence recherchée de la martensite (constituant privilégié) mais à de faibles ductilités et résiliences



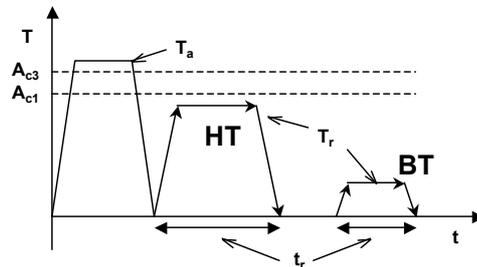
Traitements thermiques - Revenu

## 4-1. But et principe du revenu

⇒ Revenu

Correction des états extrêmes par un traitement de compromis :

- amélioration des caractéristiques de déformabilité et de tenacité
- relaxation des contraintes



Défini par une température  $T_r$  et un temps de maintien  $t_r$ , le revenu peut se faire :

- à haute température (au dessus de  $500^\circ\text{C}$ ), traitement classique qui conduit à des modifications métallurgiques importantes
- à basse température (en dessous de  $200^\circ\text{C}$ ) conduisant à de faibles transformations métallurgiques

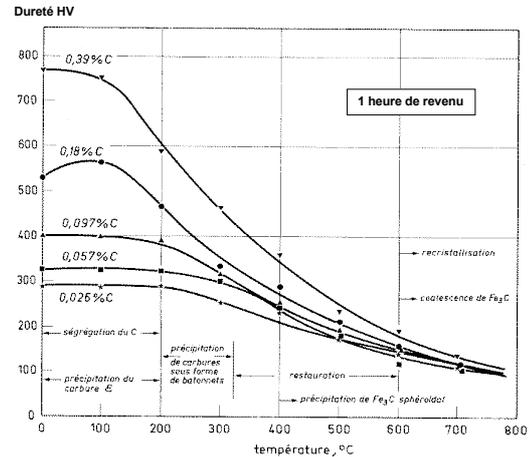
## 4-2. Transformations métallurgiques au cours du revenu

Les propriétés mécaniques obtenues après revenu dépendent des transformations subies par les constituants

Une élévation de température va favoriser l'évolution des phases hors équilibre vers des états plus proches de l'équilibre

*Perlite* et ferrite (équilibre), ainsi que *bainite* (formée de ferrite et cémentite, en quasi-équilibre) ne vont pas évoluer (uniquement la morphologie)

Ce sont la martensite et l'austénite résiduelle qui vont subir les transformations les plus importantes



Traitements thermiques - Revenu

⇒ Martensite

Deux types de phénomènes ont été mis en évidence

Vieillessement (basse températures)

Formation de carbures (hautes températures)

Jusqu'à 200°C : Appauvrissement de la martensite en carbone interstitiel, ce qui conduit à une perte de quadraticité de la maille - relaxation des contraintes dans la maille

Précipitation de *carbures de transition* sous forme de particules de très faibles dimensions ( $\approx$ nm)

Entre 200 et 350°C : Précipitation du carbone sous forme de carbures de type cémentite. Réduction de distorsion tétraogonale de la martensite.

A partir de 350°C : Retour complet de la maille cristalline de la martensite à la forme cubique centrée

Au delà de 450°C, coalescence des particules de cémentite, restauration (élimination des défauts de réseau) puis recristallisation (600-700°C) - cela conduit à des grains grossiers équiaxes et des carbures coalescés, à peu d'intérêt pratique

⇒ Bonne tenue à la rupture fragile des martensites revenues

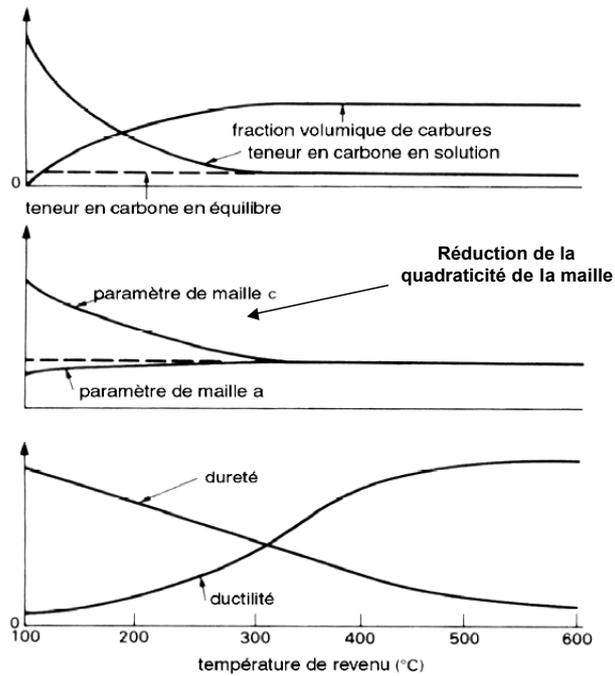
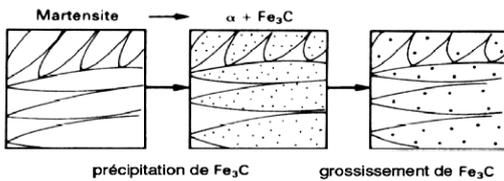
Traitements thermiques - Revenu

⇒ Martensite

Jusqu'à 350°C : Appauvrissement de la martensite en carbone interstitiel. Précipitation de carbures (de transition puis cémentite). Réduction de distorsion tétragonale de la martensite.

A partir de 350°C : Retour de la maille cristalline de la martensite à la forme cubique centrée.

Au delà de 450°C, coalescence des particules de cémentite, restauration (élimination des défauts de réseau).

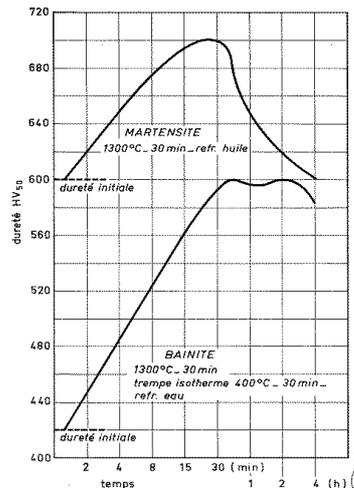


Traitements thermiques - Revenu

⇒ Effet d'éléments carburigènes

Formation (450°C) de carbures alliés qui remplacent la cémentite après dissolution de celle-ci ou par germination directe sur les dislocations restantes  
Précipitation sous forme de particules plus fines que la cémentite conduisant à un durcissement secondaire  
Coalescence (550-600°C) de ces précipités qui entraîne une diminution de dureté

⇒ Stabilité de ces carbures complexes assure de bonnes propriétés pour emplois à chaud



Cas d'un acier 0.4%C et 2.0%V

Initialement martensitique (trempé à l'huile) ou bainitique (maintien isotherme à 400°C pendant 30 mn puis trempé à l'eau)

Revenu à 600°C augmente la dureté : cémentite (de la bainite ou issue de la transformation de la martensite) est remplacée par des carbures de vanadium très fins et très dispersés

Traitements thermiques - Revenu

## ⇒ Austénite

Le revenu étant un maintien isotherme, la décomposition de l'austénite suivra une cinétique voisine de celle décrite par le diagramme TTT  
Les temps d'incubation sont en général raccourcis

### Deux cas

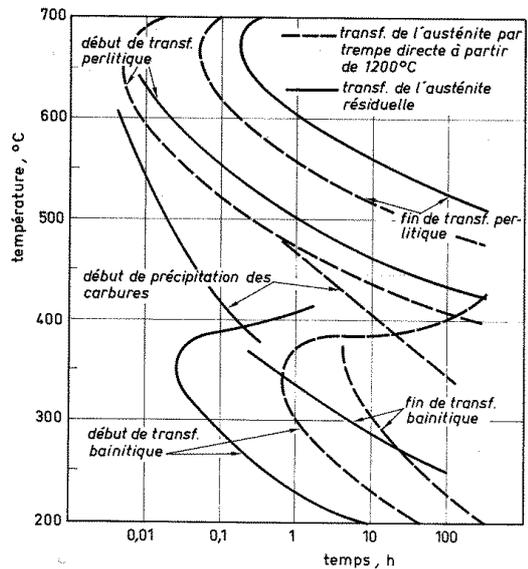
- le diagramme TTT présente une transformation bainitique de courte durée, la décomposition de l'austénite aura lieu entre 200 et 400°C

- le diagramme TTT présente un temps d'incubation élevé pour la transformation bainitique (aciers fortement alliés), la décomposition de l'austénite aura lieu entre 650 et 700°C

*Acier 1.0%C et 1.4%V*

Acier durci par trempe contenant 50% d'austénite résiduelle

Courbe TTT au revenu est proche de la courbe classique  
Transformation perlitique un peu retardée mais précipitation des carbures à 450°C et transformation bainitique sont accélérées

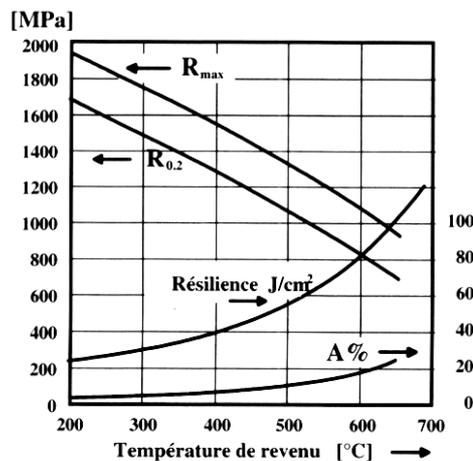


Traitements thermiques - Revenu

### 4-3. Evolution des propriétés mécaniques au cours du revenu

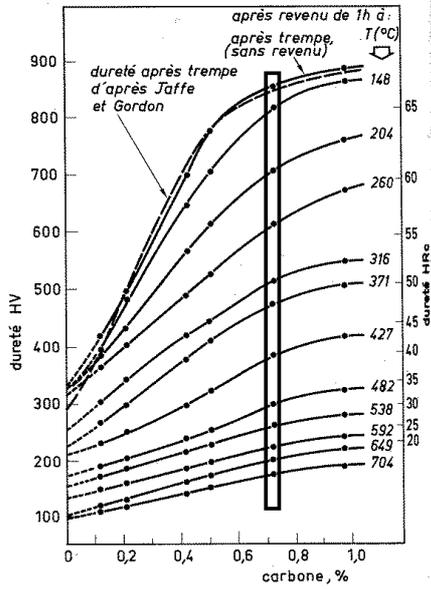
Modifications de microstructures ont des conséquences importantes sur les propriétés mécaniques  
Le revenu est un moyen souple pour ajuster ces dernières aux exigences du bureau d'études

Diagramme de revenu pour un acier de composition 0,34% m C, 1,5% m Cr, 0,2% m Mo et 1,5% m Ni.



Traitements thermiques - Revenu

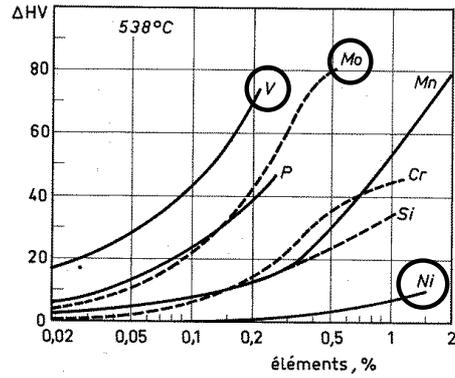
⇒ Carbone



⇒ Composition chimique

⇒ Éléments d'alliages

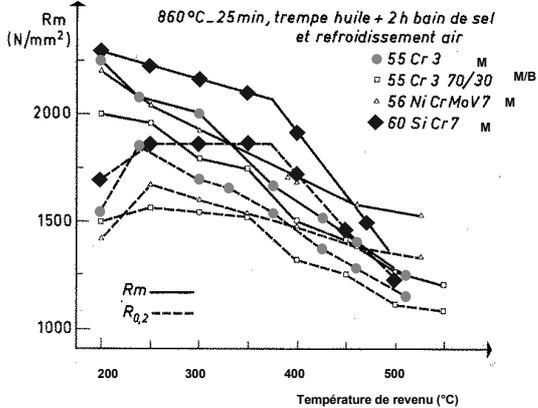
Variation de dureté liée à ces éléments est indépendante de la teneur en carbone



Durcissement secondaire pour V et Mo  
Pas d'effet pour Ni

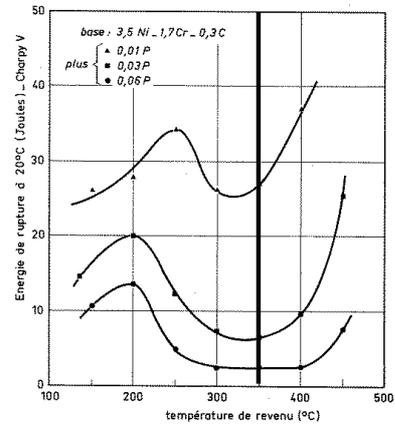
⇒ Conditions de revenu

Evolution des caractéristiques mécaniques en fonction de la température de revenu (2 h)



⇒ Fragilisation au revenu

Chute de la résilience (revenu à 350°C) liée à la cémentite mais surtout aux impuretés



Ségrégation du P aux anciens joints de grains austénitiques (lors de l'austénitisation)  
Précipitation de la cémentite sur ces derniers déjà affaiblis par P