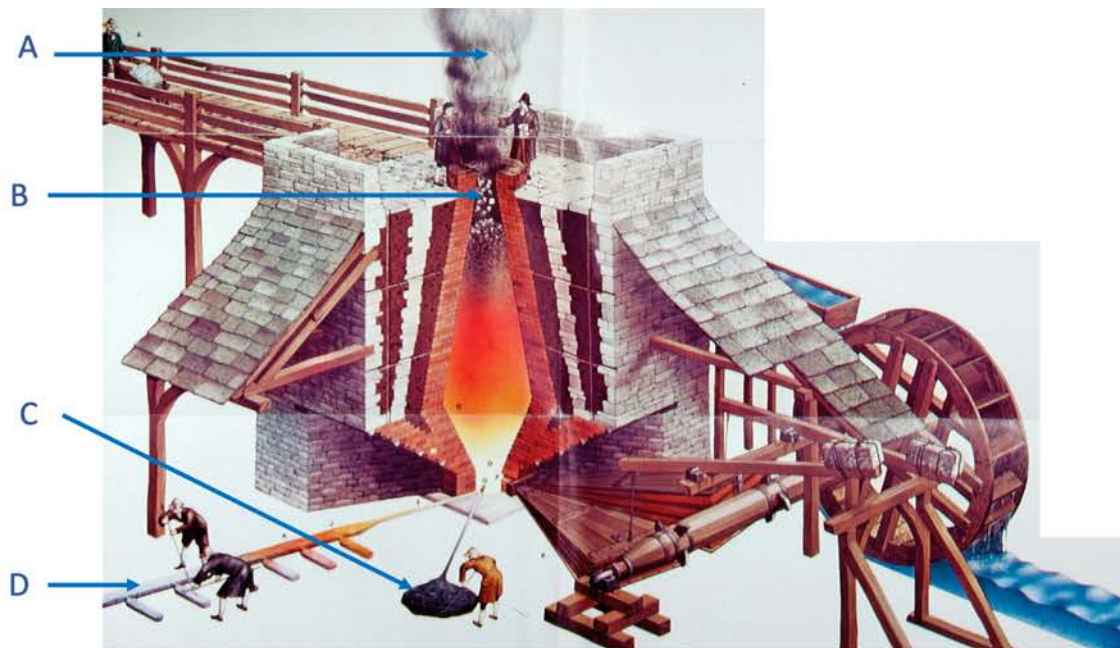


Comportement Mécanique des Matériaux

EPFL - Cours MSE 234, Edition 2025

Exercices du chapitre 4

Exercice 4-1 – La figure ci-dessous illustre un haut-fourneau aux Etats-Unis d’Amérique au XVIIIe siècle. Ecrivez ci-dessous de quoi sont constituées les matières ou matériaux indiqués par chacune des 4 flèches A, B, C et D. Cherchez pour chacune de ces lettres à être précis et à inclure toutes les espèces chimiques qu’elles englobent.



Exercice 4-2 – a - Pourquoi la fonte sortant du haut fourneau contient-elle toujours du carbone ?

b – La fonte contient aussi toujours du silicium en solution, car lui aussi est réduit par le carbone. Pouvez-vous montrer que cela implique que la température au bas du haut-fourneau excède 1600°C si les gaz sont tout à une pression d’une atmosphère (ce que supposent les courbes tracées dans le diagramme d’Ellingham) ?

Exercice 4-3 – Démontrez que les valeurs du rayon relatif (rapporté au rayon de l’atome) du site interstitiel octaédrique en diapo 4-17 sont bien 0.15 et 0.41 pour les deux structures cubique centré et cubique faces centrées, respectivement. Nota: dans la structure CC les atomes de fer se touchent selon la diagonale du cube, alors que dans la structure CFC ils sont en contact selon la diagonale de la face.

Exercice 4-4 - (Ashby & Jones exercice 12.3)

12.3 The densities of pure iron and iron carbide at room temperature are 7.87 and 8.15 Mg m⁻³, respectively. Calculate the percentages by volume of α and Fe₃C in pearlite.

Answers

α , 88.9%; Fe₃C, 11.1%.

a – faites le calcul pour trouver ces valeurs.

b - Pourquoi ces valeurs sont-elles très proches des valeurs massiques ? Que pouvez-vous conclure concernant la lecture du diagramme de phase fer-carbone ?

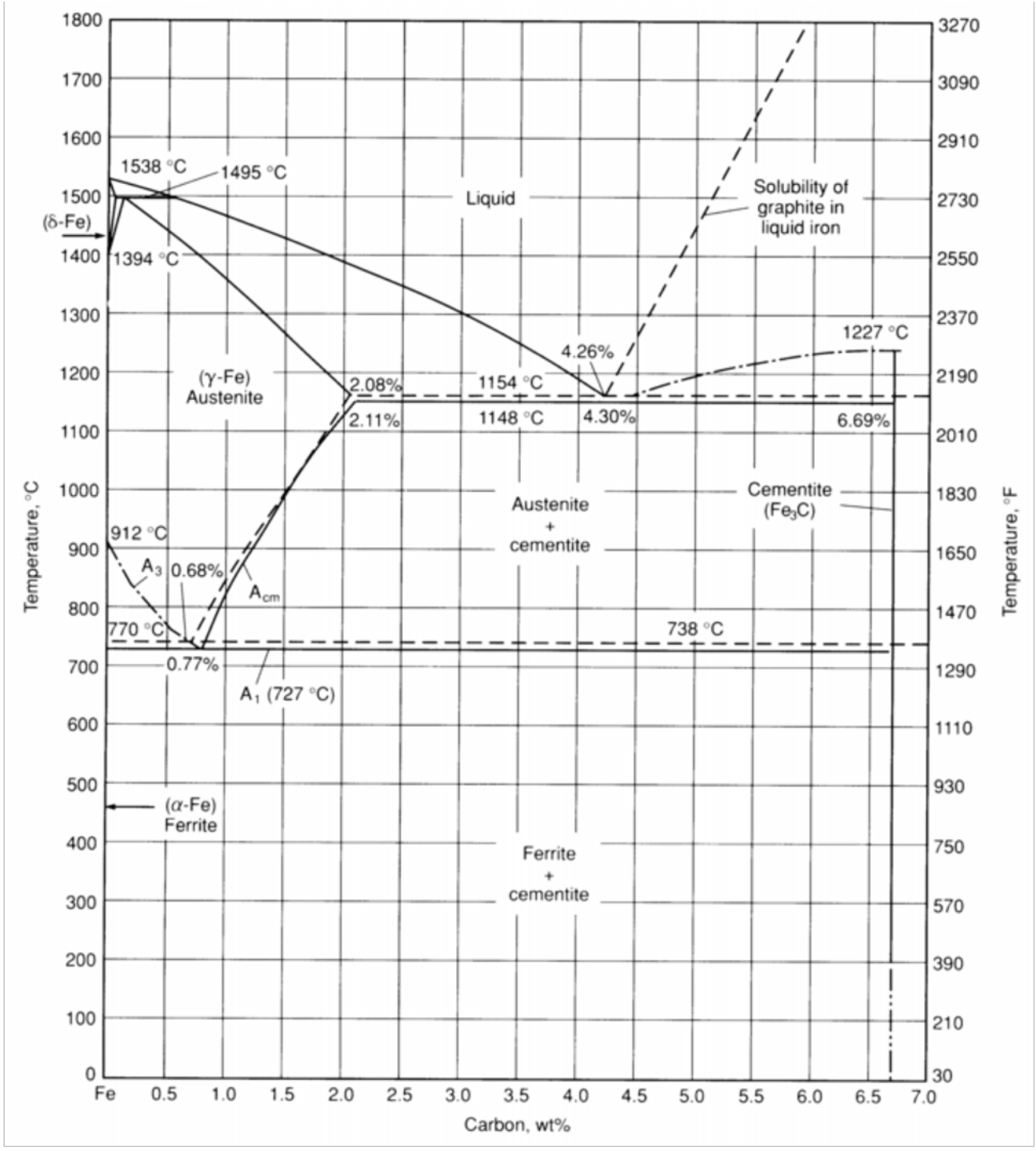
Exercice 4 -5 –Le diagramme de phase Fe-C est reproduit ci-dessous. Considérons un alliage fer-1% pds carbone.

a – Pouvez-vous faire un sketch dans le petit rectangle de gauche de sa microstructure à 950°C ?

b – Pouvez-vous faire un sketch dans le petit rectangle de droite de sa microstructure à température ambiante après un refroidissement lent ?

c – La cémentite est un carbure fragile. Pourquoi cet alliage aura-t-il dans cet état une faible élongation à rupture en traction ?

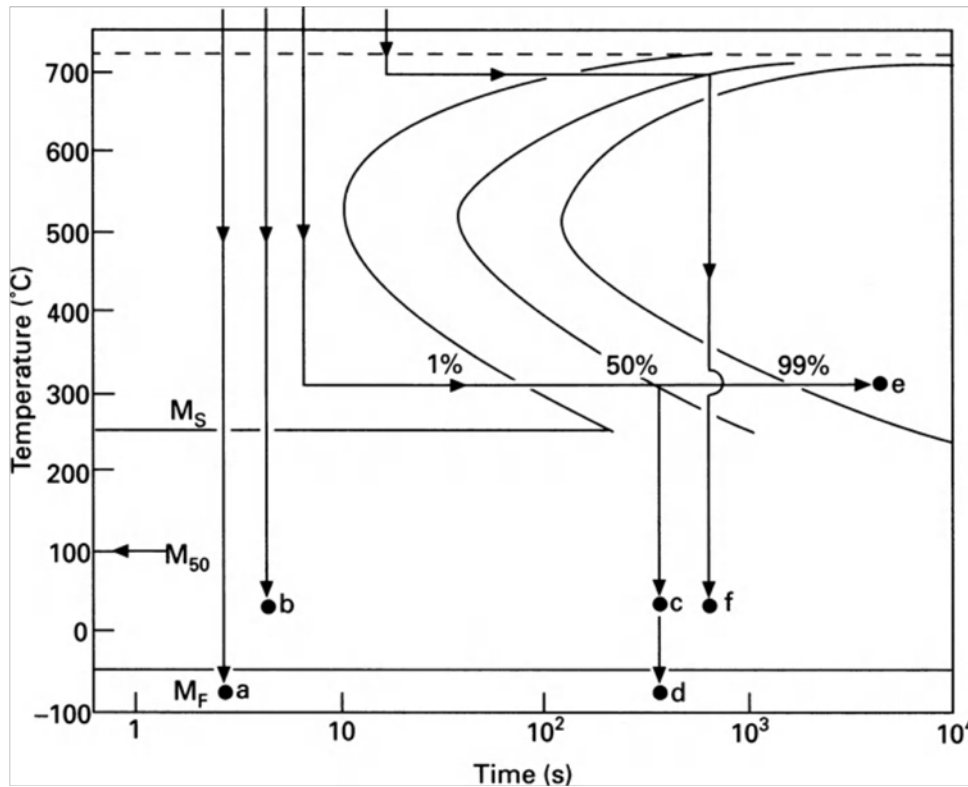




(a) Diagramme de phases du système Fe-C. Les lignes pleines sont pour le système Fe-Fe₃C (fer-cémentite), les lignes en traitillés pour le système Fe-C (fer-graphite)

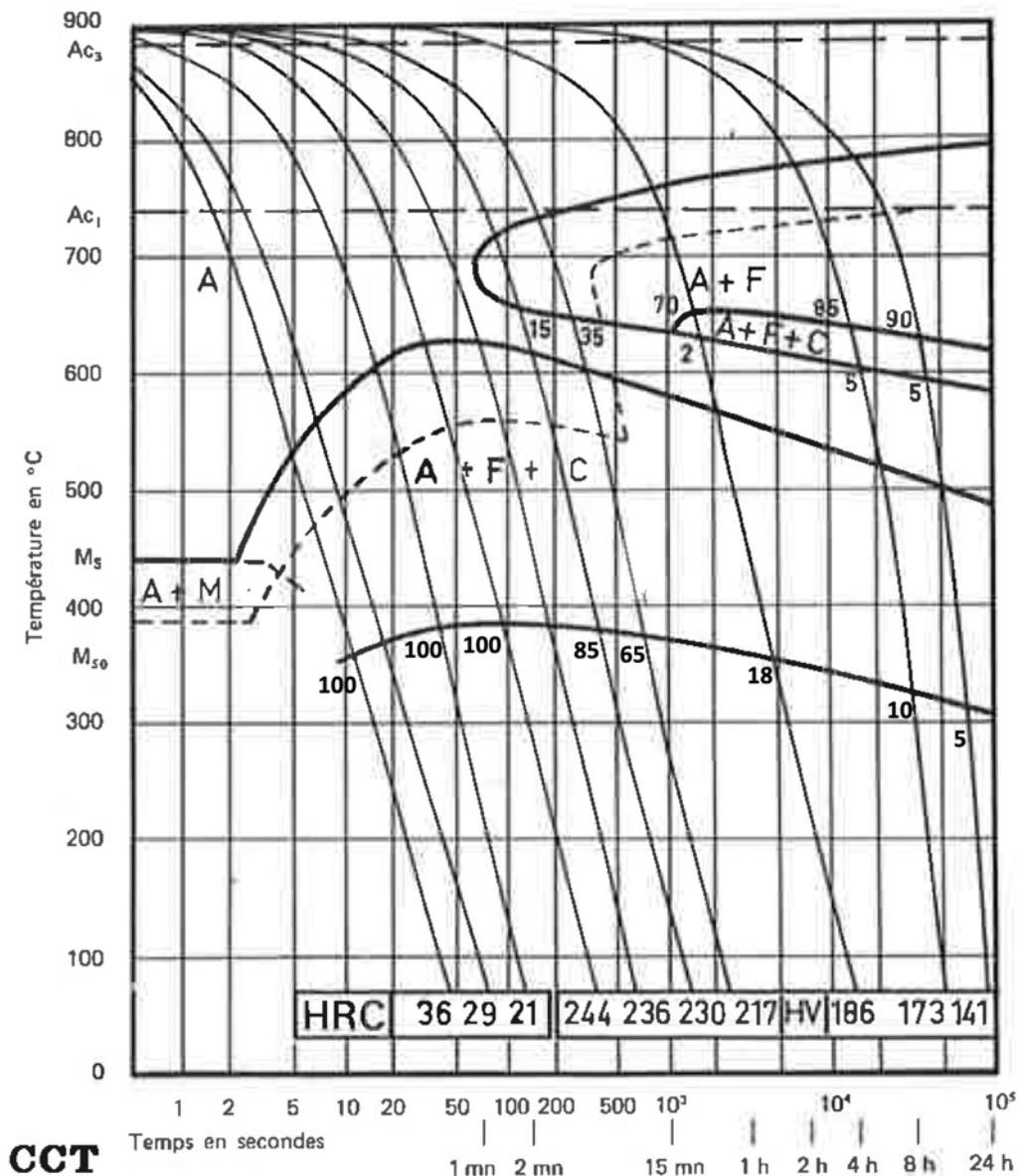
Exercise 4-6 (= Ashby & Jones exercise 12.1)

The diagram which follows shows the TTT diagram for a coarse-grained, plain carbon steel of eutectoid composition. Samples of the steel are austenitized at 850 °C and then subjected to the quenching treatments shown on the diagram. Describe the microstructure produced by each heat treatment.



Exercice 4-7 –Ci-dessous vous trouverez le diagramme TRC (CCT diagram) d'un acier faiblement allié. Note importante : la température M_f est inférieure à 0°C pour cet alliage.

Composition: 0.14% C - 1.20% Mn - 0.23% Si - 0.017% S - 0.016% P - 0.15% Ni - 0.10% Cr - 0.48% Mo - 0.15% Cu - 0.065% V Grain size: 8 Austenitized at 900°C (1652°F) for 30 min



Cochez la réponse correcte dans les options ci-dessous

Pour produire une structure 100% bainitique il faut

- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en moins de 2 secondes
- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en un temps situé entre 1 et 15 minutes
- ce n'est pas possible.

Pour produire une structure 100% perlitique il faut

- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en moins de 2 secondes
- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en un temps situé entre 1 et 15 minutes
- ce n'est pas possible.

Pour produire une structure 100% ferritique il faut

- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en moins de 2 secondes
- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en un temps situé entre 1 et 15 minutes
- ce n'est pas possible.

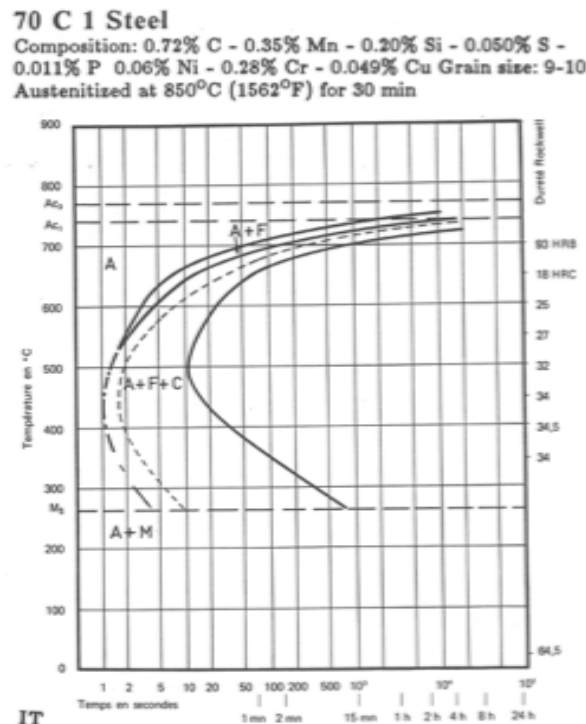
Pour produire une structure 100% martensitique il faut

- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en moins de 2 secondes
- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en un temps situé entre 1 et 15 minutes
- ce n'est pas possible.

Pour produire une structure contenant au moins 90% de ferrite il faut

- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en 24 heures ou davantage
- tremper l'alliage de façon à atteindre la température ambiante en 5'000 secondes.
- ce n'est pas possible.

Exercice 4-8 –Ci-dessous vous trouverez le diagramme TTT d'un acier au carbone (70 C 1) faiblement allié.



a – Que veulent dire sur ce diagramme les lettres A, F, C et M ?

REPONSE :

A = _____
F = _____
C = _____
M = _____

b – A quoi pouvez-vous deviner que cet acier est hypoeutectoïde ?

c – Quelles lettres mettriez-vous pour désigner la région tout à droite des courbes en forme de C ?

d – Supposez que M_f soit situé à une température en dessous de 0°C . Quelle microstructure aurez-vous après une trempe de l’alliage de 850°C à l’ambiante en moins d’une seconde ?

e – Pouvez-vous décrire la microstructure que produira une trempe de l’alliage de 850°C à 700°C suivie d’un maintien de celui-ci à 700°C pendant 24 heures ?

f – Pouvez-vous décrire la microstructure que produira une trempe de l’alliage de 850°C à 700°C suivie d’un maintien de celui-ci à 700°C pendant 100 secondes, suivi d’une trempe très rapide (en moins de 1 seconde) à la température ambiante ?

Exercice 4-9

a - Est-il réaliste de tremper pour produire de la martensite (“durcir par trempe”) une pièce de 5 cm d’épaisseur en acier au carbone sans autres éléments d’alliage qu’un ou deux pourcent de manganèse et contenant 0.52% de carbone ?

b - Pouvez-vous estimer la microstructure et la dureté de cet acier aux points C et D le long du barreau Jominy dessiné en diapo 57 du Chapitre 4 ?

Nota: les données requises pour répondre à ces questions sont parmi les diapos du chapitre 4 de ce cours

Exercice 4-10 - Vous avez réalisé un essai Jominy sur l’acier CK45 (0.45%C - 0.65%Mn et $(\text{Cr}+\text{Mo}+\text{Ni}) < 0.63\%$) ainsi que sur l’acier X45 (0.45%C - 0.25%Si - 0.4%Mn - 1.3% Cr - 0.25 %Mo - 4%Ni). Les deux courbes Jominy obtenues sont représentées en Fig. 7.
(Note: toutes les compositions d’alliages sont exprimées en pourcentage massique).

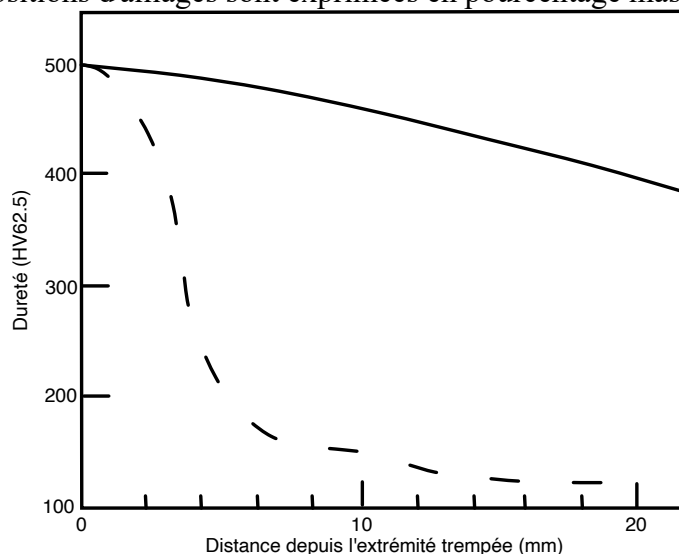


Fig. 7 : Courbes de la dureté en fonction de la distance depuis l'extrémité trempée lors d'un essai Jominy.

a) - À quel acier correspond chaque courbe ?

Courbe en pointillés : _____

Courbe en trait continu : _____

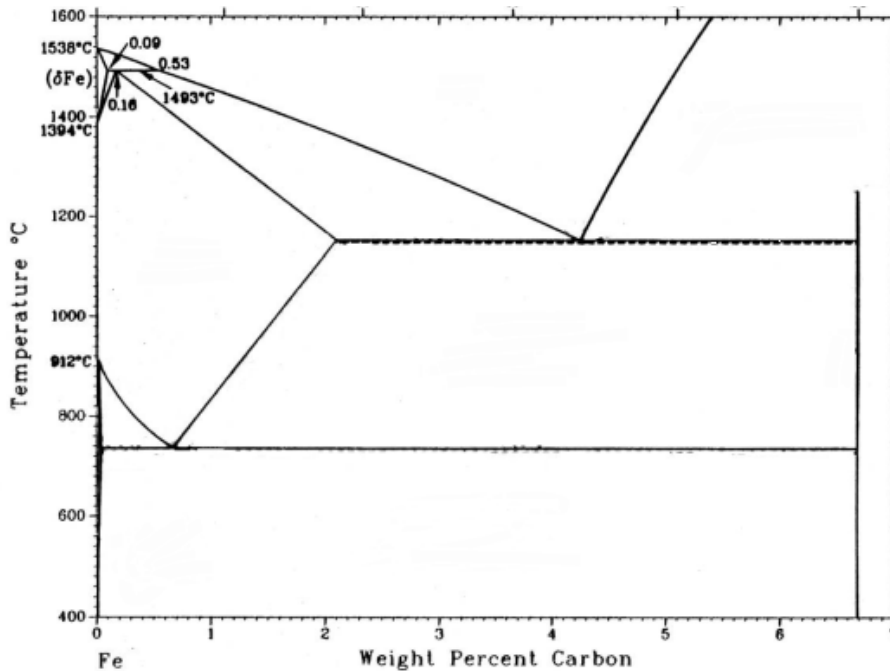


Fig. 8 : Diagramme de phase Fe-Fe₃C.

b) - Vous voulez austénitiser un acier au carbone, qui contient 0.6%C sans aucun autre élément d'alliage. Dans quelle gamme de températures allez-vous chauffer cet acier et pourquoi ? Vous pouvez vous aider du diagramme de phase Fe-Fe₃C donné en Fig. 8.

c) - Après son austénitisation, vous trempez rapidement cet alliage dans l'eau à température ambiante et vous observez la microstructure résultante à l'aide d'un microscope optique. Est-il possible que vous trouviez dans la microstructure obtenue une phase qui ne figure pas sur le diagramme de phase Fe-Fe₃C, et si oui laquelle et pourquoi est-il possible qu'on l'observe ?

d) - Après ce traitement thermique de l'échantillon, on voit que sa surface est devenue noire ; pourquoi ?

Exercice 4-11

Comment feriez-vous pour transformer cet acier allié au Cr-Ni-Mo en

a - 100% de martensite

b - 100% de bainite

c - 40% de ferrite et 60% de perlite ?

d - 20% de bainite et 80% de martensite ?

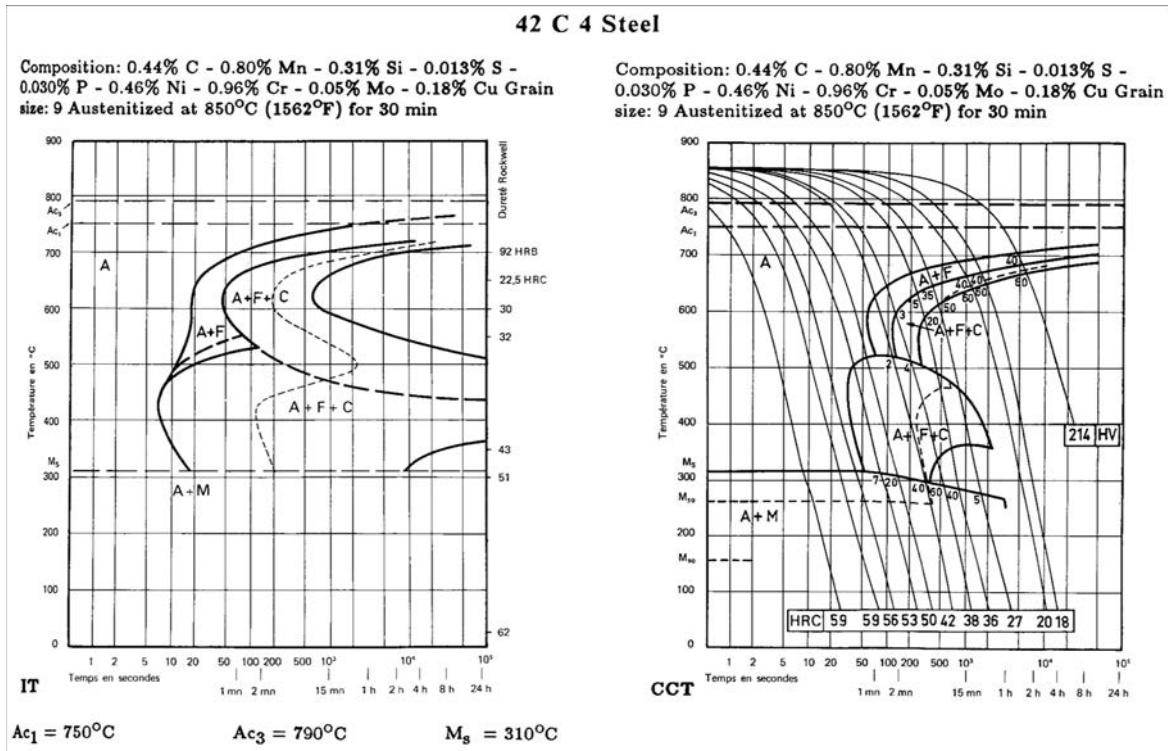
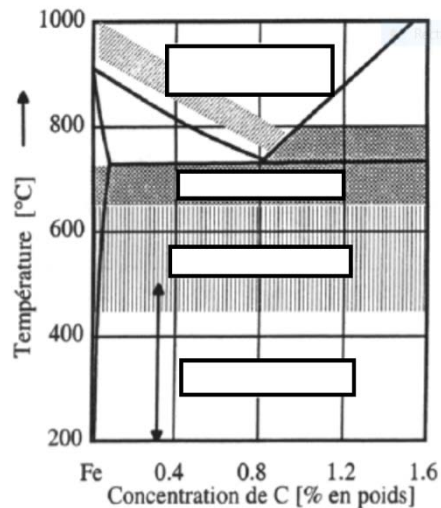


FIGURE IV-53 – Diagrammes TTT et TRC de l'acier 42 C 4.

Source: G.F. Vander Voort, *Atlas of Time-Temperature Diagrams for Irons and Steels*, ASM International, U.S.A., 1991.

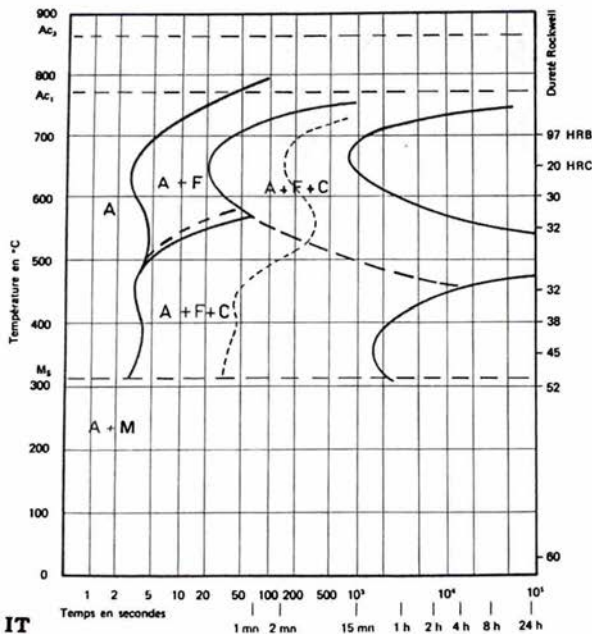
Exercice 4-12 – Inscrivez dans chacune des cases superposées au diagramme fer-carbone ci-dessous le traitement thermique ayant lieu dans la plage de températures où la case se situe.



- Revenu
- Recristallisation
- Détente
- Normalisation

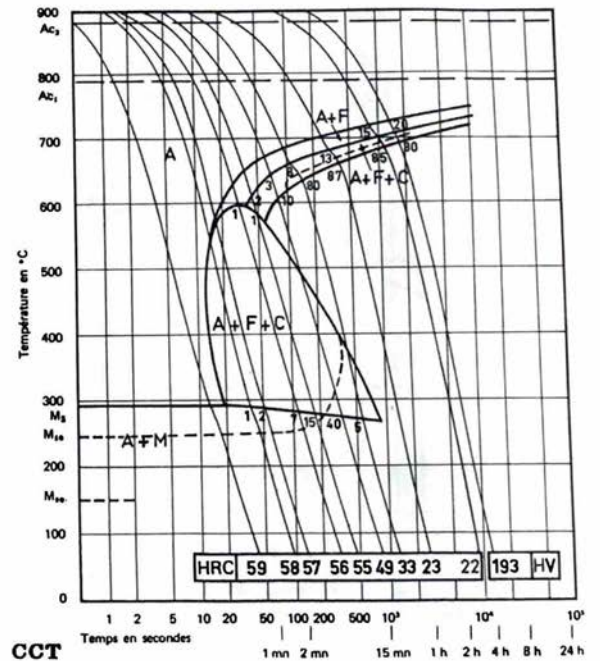
Exercice 4-13 – Ci-dessous vous trouverez les diagrammes TTT et TRC de deux aciers faiblement alliés et de compositions proches, que nous allons supposer être identiques.

Composition: 0.45% C - 0.55% Mn - 1.31% Si - 0.005% S - 0.013% P - 0.21% Ni - 0.60% Cr - 0.22% Mo - 0.27% Cu - <0.05% V - trace Ti Grain size: 11 Austenitized at 900°C (1652°F) for 30 min

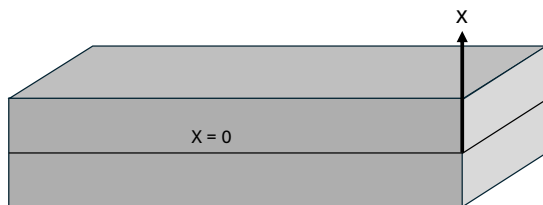


$Ac_1 = 770^{\circ}C$ $Ac_3 = 860^{\circ}C$ $M_s = 310^{\circ}C$

Composition: 0.42% C - 0.70% Mn - 1.40% Si - 0.005% S - 0.015% P - 0.24% Ni - 0.68% Cr - 0.19% Mo - 0.03% Cu Grain size: 9 Austenitized at 880°C (1616°F) for 30 min



Une plaque de cet acier mesurant 4 cm d'épaisseur est trempée après austénitisation à 900°C de façon telle que, lors de la trempe, la température $T = 200^{\circ}C$ soit atteinte en $t = 2000 - 99x$ secondes où x est la distance en mm dans le sens de l'épaisseur, comptée à partir du centre de la plaque.



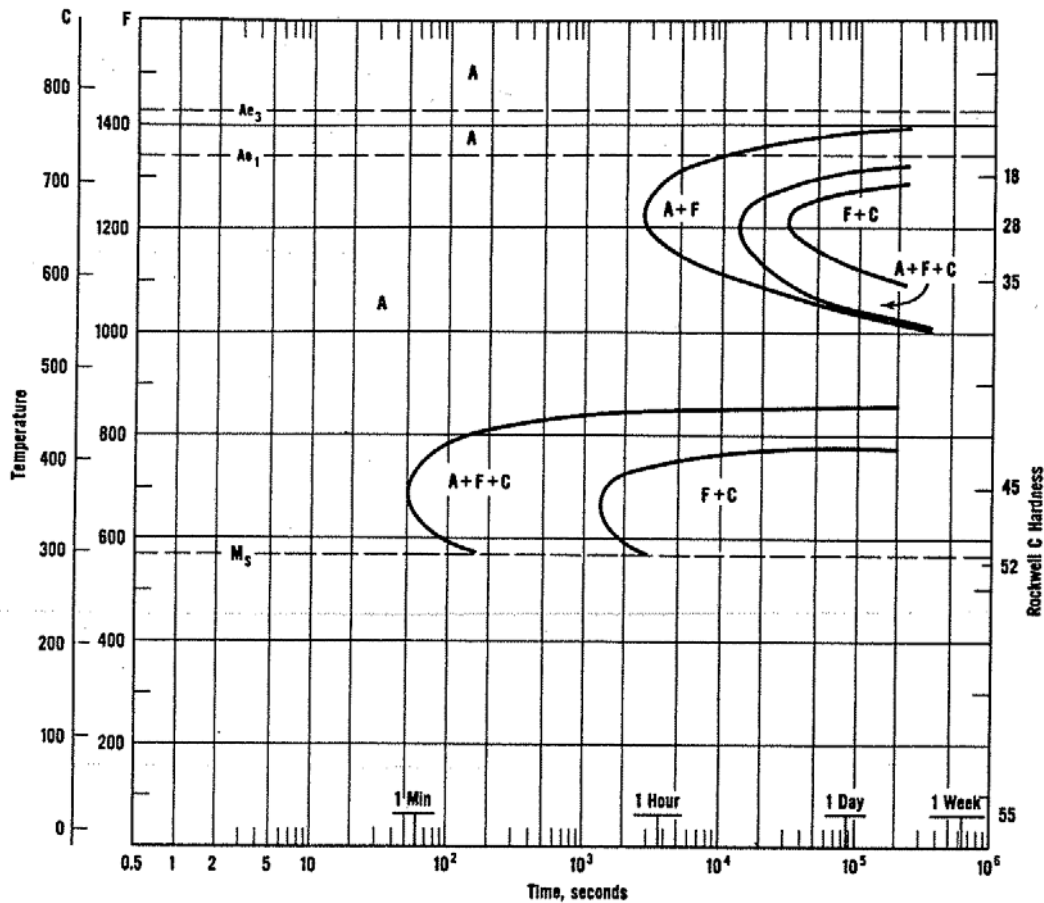
- a – Marquez directement sur le diagramme TTT (seulement) les domaines de formation de la perlite et de la bainite
- b - Quelle sera la microstructure de l'acier au centre de la plaque (donnez les phases et leur proportion) ?
- c - Quelle sera la microstructure de l'acier à la surface de la plaque (donnez les phases et leur proportion) ?
- d - Quelle sera l'épaisseur de cette plaque d'acier trempé contenant au moins 50% de martensite ?
- e – Cet acier est-il inoxydable ?
- f - Nommez un rôle du molybdène dans cet alliage.

g – Est-ce que, avec cette répartition de la microstructure, cette plaque d'acier trempé sera performante si elle doit résister sans se déformer à une contrainte élevée (i) en traction ou (ii) en flexion ?

Exercice 4-14 – Ci-dessous vous trouverez le diagramme TTT d'un acier dont la composition est donnée dans l'en-tête du diagramme. Supposez que M_f soit supérieure à l'ambiante.

4330 Mod. (Si + V) Steel

Composition: 0.34% C - 0.98% Mn - 1.37% Si - 0.015% P -
 0.005% S - 1.82% Ni - 0.95% Cr - 0.42% Mo - 0.14% V Grain
 size: 4 Austenitized at 900°C (1650°F)



- a – Quelle est la température de la transformation eutectoïde pour cet alliage ?
- b – Comment feriez-vous pour produire, au sein de cet alliage, une structure entièrement martensitique ?
- c – Comment feriez-vous pour produire, au sein de cet alliage, une structure constituée à 100% de bainite inférieure (bainite fine formée vers le bas du domaine de formation de la bainite) ?
- d – Est-il possible de déformer cet alliage à l'état 100% austénique en dessous des températures où celle-ci est stable ? Quel pourrait être l'intérêt pratique d'une telle opération ? tout bénéfique raisonnable (même si pas ce qui est ci-dessus)

e – Comment feriez-vous pour produire, au sein de cet alliage, une structure combinant en proportions relativement égales de la ferrite et de la martensite ?

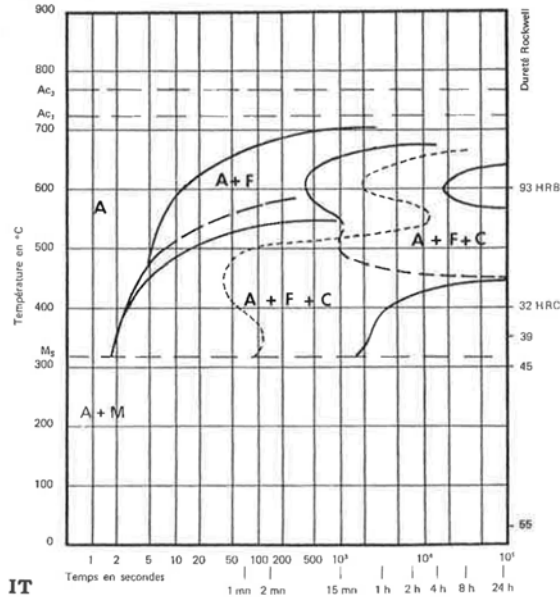
Exercice 4-15

Ci-dessous vous trouverez les diagrammes TTT et TRC d'un acier faiblement allié.

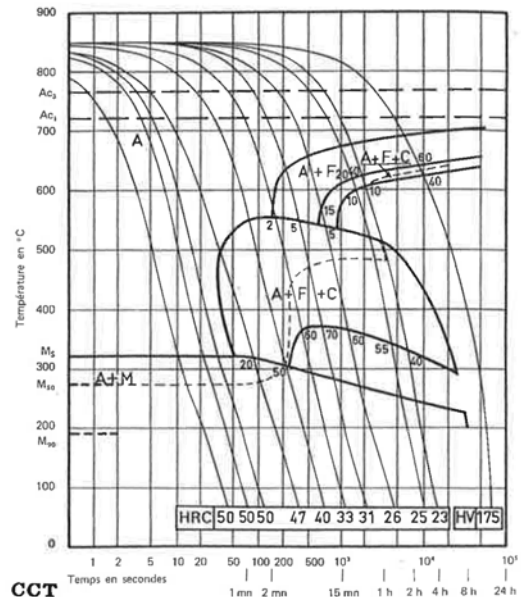
30 NC 11 Steel

Composition: 0.32% C - 0.30% Mn - 0.20% Si - 0.008% S - 0.017% P - 2.95% Ni - 0.69% Cr - <0.10% Mo - 0.31% Cu - <0.030% V - 0.06% W Grain size: 12 Austenitized at 850°C (1562°F) for 30 min

Composition: 0.32% C - 0.30% Mn - 0.20% Si - 0.008% S - 0.017% P - 2.95% Ni - 0.69% Cr - <0.10% Mo - 0.31% Cu - <0.030% V - 0.06% W Grain size: 12 Austenitized at 850°C (1562°F) for 30 min



$Ac_1 = 720^{\circ}C$ $Ac_3 = 765^{\circ}C$ $M_s = 320^{\circ}C$



a – Que veulent dire les lettres A, C, F, M dans ce graphe ?

b – Cochez la réponse correcte dans les options ci-dessous

Pour produire une structure presque entièrement martensitique on peut

- tremper l'alliage jusqu'à la température ambiante de façon telle que 400°C soit traversé en moins de 20 secondes
- tremper l'alliage jusqu'à la température ambiante de façon à atteindre 200°C en plus de 8 heures
- ce n'est pas possible.

Pour produire une structure 100% perlitique on peut

- tremper l'alliage de façon à atteindre 200°C en plus de 8 heures
- tremper l'alliage de façon à atteindre 500°C en moins de 10 secondes et le maintenir pendant plus de 8 heures à cette température
- ce n'est pas possible.

Pour produire une structure composée à 50% de bainite et 50% de martensite on peut

- tremper l'alliage de façon à atteindre 200°C en moins de 2 secondes
- tremper l'alliage de façon à atteindre 300°C en 200 secondes puis continuer à le refroidir jusqu'à l'ambiante ce n'est pas possible.

Pour produire une structure contenant à 60% de ferrite et 40% de perlite on peut

- tremper l'alliage de façon à atteindre 200°C en une heure
- tremper l'alliage de façon à atteindre 200°C en plus de 10 heures
- Ce n'est pas possible.

Pour produire une structure 100% bainitique on peut

- tremper l'alliage jusqu'à la température ambiante de façon telle que 400°C soit traversé en 300 secondes exactement
- tremper l'alliage de façon à atteindre 350°C en moins de 2 secondes puis le maintenir pendant plus de 2 heures à cette température puis refroidir l'alliage jusqu'à la température ambiante
- Ce n'est pas possible.

c - Dans le diagramme ci-dessous, vous trouverez les courbes de refroidissement température/temps, en fonction du diamètre d'un long barreau cylindrique de l'acier des diagrammes TTT et TRC ci-dessus, lors d'une trempe depuis la température d'austénitisation de 850°C dans une bain d'huile à température ambiante :

- en traits continus au cœur (= le long de l'axe central) du barreau
- en traits pointillés à la surface du barreau. Notez que pour les trois diamètres les plus petits, de 10, 20 et 40 mm, les traits continus et pointillés sont superposés faisant qu'on ne distingue plus ces derniers.

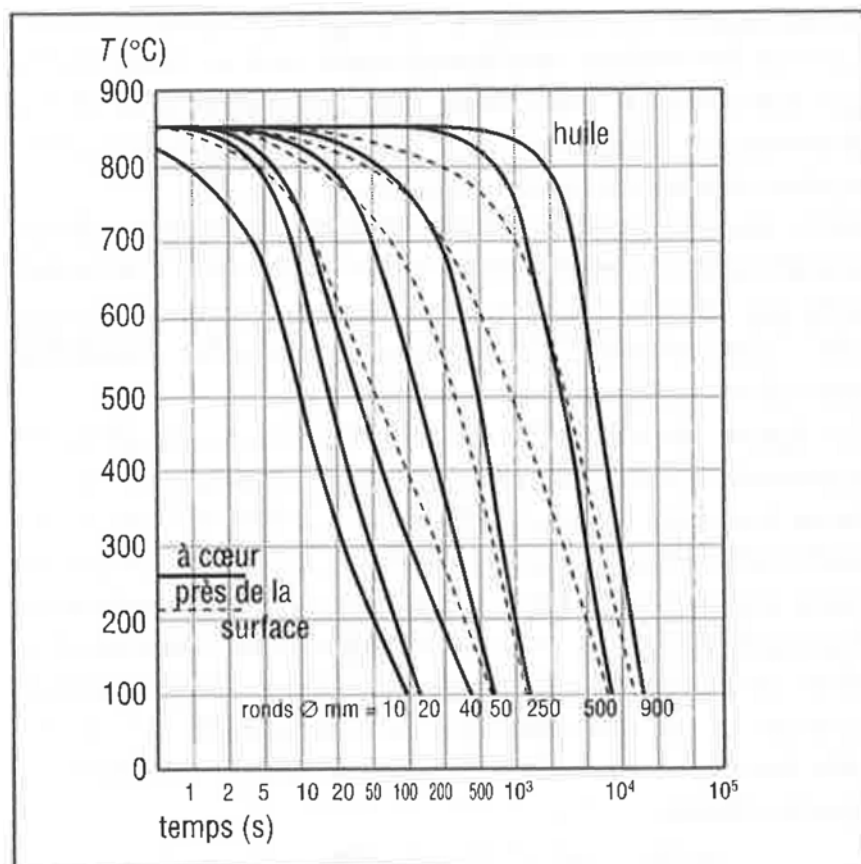
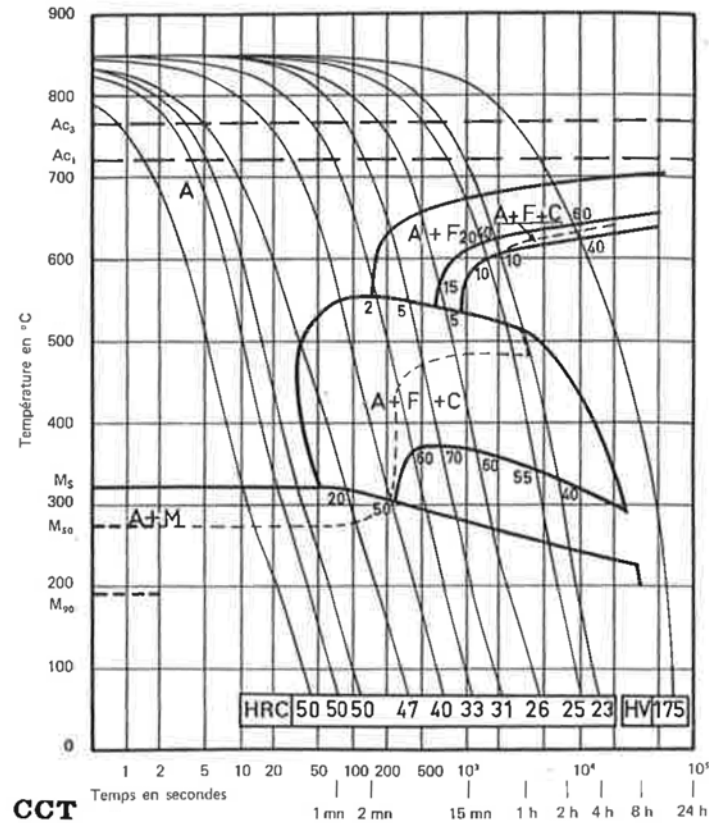


Fig. 28. Courbes de refroidissement dans l'huile de ronds de divers diamètres (d'après l'atlas IRSID)

Marquez sur le diagramme TRC de l'acier 30 NC 11 (reproduit en plus grand ci-dessous) les temps auxquels les températures de 700, 500, 300 et 100°C sont atteintes à cœur et en surface du barreau pour une trempe à l'huile d'un barreau de diamètre 50 mm.

Composition: 0.32% C - 0.30% Mn - 0.20% Si - 0.008% S - 0.017% P - 2.95% Ni - 0.69% Cr - <0.10% Mo - 0.31% Cu <0.030% V - 0.06% W Grain size: 12 Austenitized at 850°C (1562°F) for 30 min



d - Quelle sera sa structure en chacun de ces deux endroits (cœur et surface) ?

Exercice 4-16

En TP, vous avez mesuré la résilience d'un acier de cémentation pour décolletage C15Pb dont la composition est Fe - 0.15%C, 0.15-0.3%Pb et vous avez obtenu la courbe tracée sur la Fig. 1 ci-dessous.

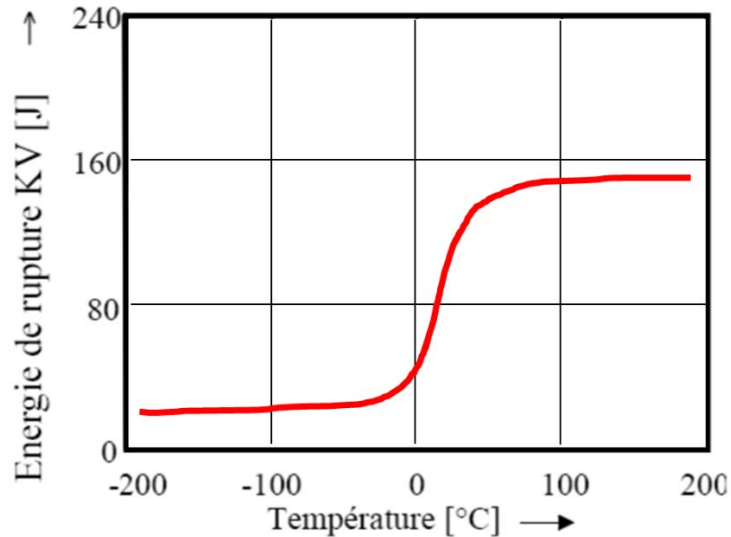


Fig. 1 : Courbe de l'énergie de rupture en fonction de la température pour le matériau C15Pb obtenue avec des éprouvettes ISO-V.

- Dessinez sur ce même graphe (Fig. 1), la courbe que vous vous attendez à obtenir après le même essai si vous ajoutez 3.5% de Ni à cet acier. Nommez cette courbe a).
- Dessinez sur ce même graphe (Fig. 1), la courbe que vous vous attendez à obtenir si vous avez un acier de la composition suivante : <0.07%C, 18%Cr, 10%Ni qui est non magnétique. Nommez la b).
- Quel type d'entaille sur l'éprouvette d'essai de résilience utiliseriez-vous, et pourquoi, pour mesurer la résilience d'un matériau très fragile ?

Exercice 4-17

a - sur la base du graphique page suivante calculez les constantes de la loi de Hall-Petch

$$\sigma_{(\varepsilon=x\%)} = \sigma_o + k D^{-1/2} ;$$

pour l'acier contenant 0.09% de carbone et celui contenant 0.20 % de carbone.

b – Supposons que les deux aciers aient la même faible teneur en autres éléments d'alliage. Quelle est la différence dans la fraction massique (ou volumique, les deux étant proches; voir exercice 4.4) de perlite entre les deux alliages ?

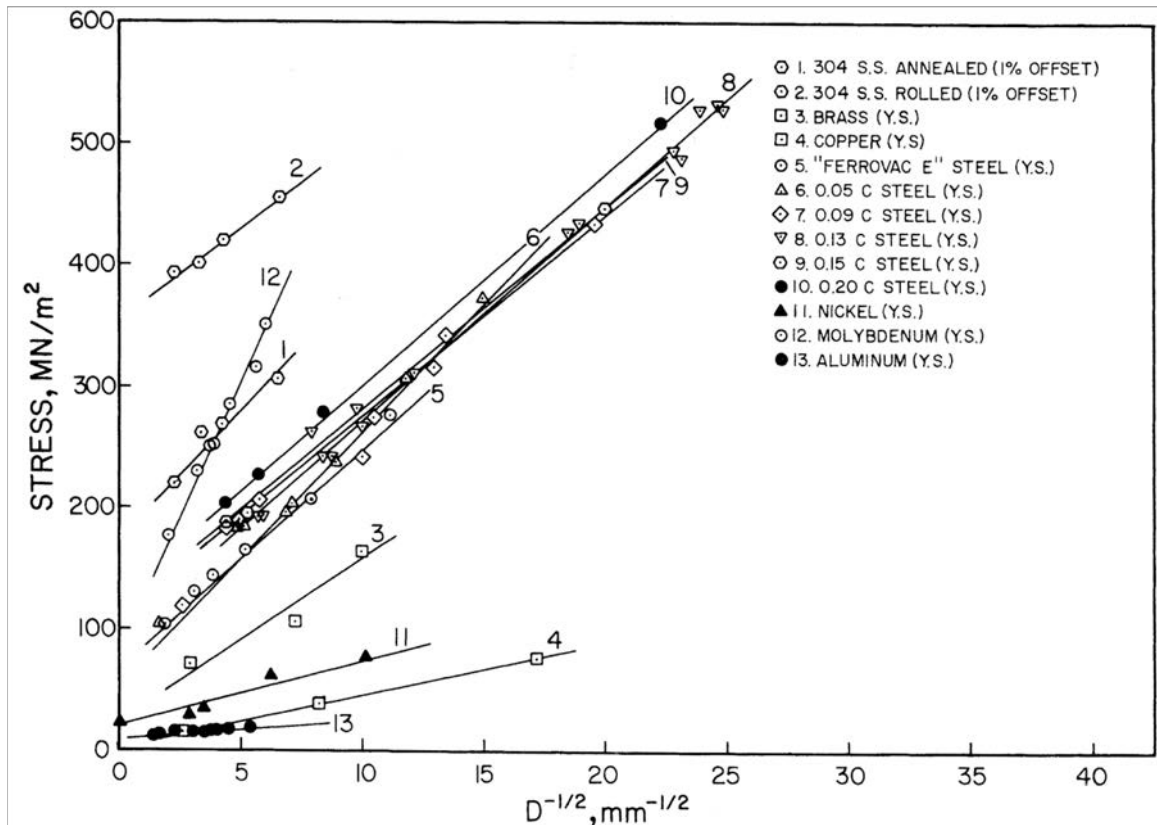


FIGURE V-4 – Relation entre la taille des grains et la limite d'élasticité de différents métaux.
Source: M.A. Meyers, K.K. Chawla, *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice-Hall, U.S.A., 1998.

Exercice 4-18

En utilisant le diagramme de Pryce & Andrews (diapo 94) pouvez-vous dire quelle est la microstructure de l'acier inoxydable donné en diapo 74 (tirée du livre de Ashby & Jones) dont la composition est donnée comme Fe+0.1%C+0.5%Mn+18%Cr+8%Ni ?
Un aimant va-t-il l'attirer ?

Exercice 4-19

Supposez que vous réchauffiez à 780°C la fonte grise dont vous voyez ci-contre la microstructure après une solidification et un refroidissement lents. Elle est faite de fer, de 3.05% carbone avec assez peu de silicium et de manganèse pour qu'il se comporte comme un alliage binaire fer-carbone.
Quelle sera sa microstructure à 780°C ?
Puis de 780°C vous refroidissez l'alliage plus rapidement, en quelques minutes seulement, jusqu'à l'ambiante. Que sera selon vous devenue sa microstructure ?

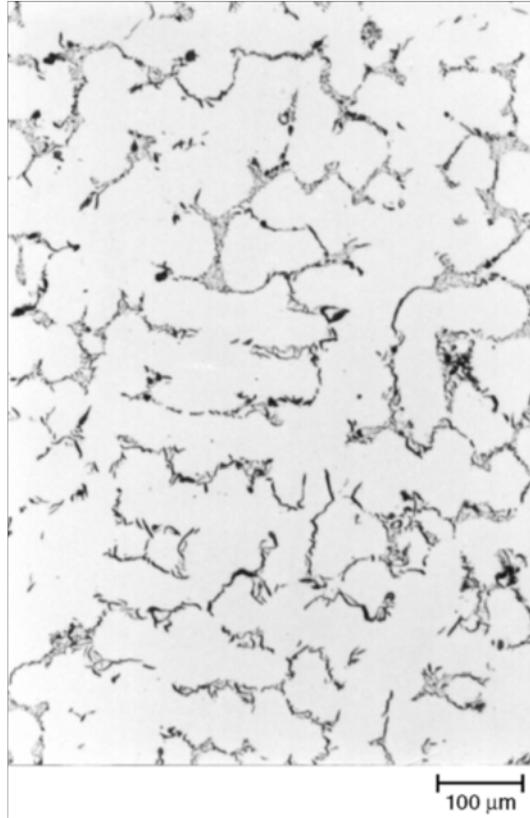


FIGURE V-57 – Microstructure d'une fonte hypoeutectique à 3.05% pds C_{eq} , plaquettes de graphite type D. Les dendrites proeutectoïdes sont visibles.
Source: ASM International *Handbook online*, Vol. 9, 2005.