



UNIVERSITÉ
LAVAL

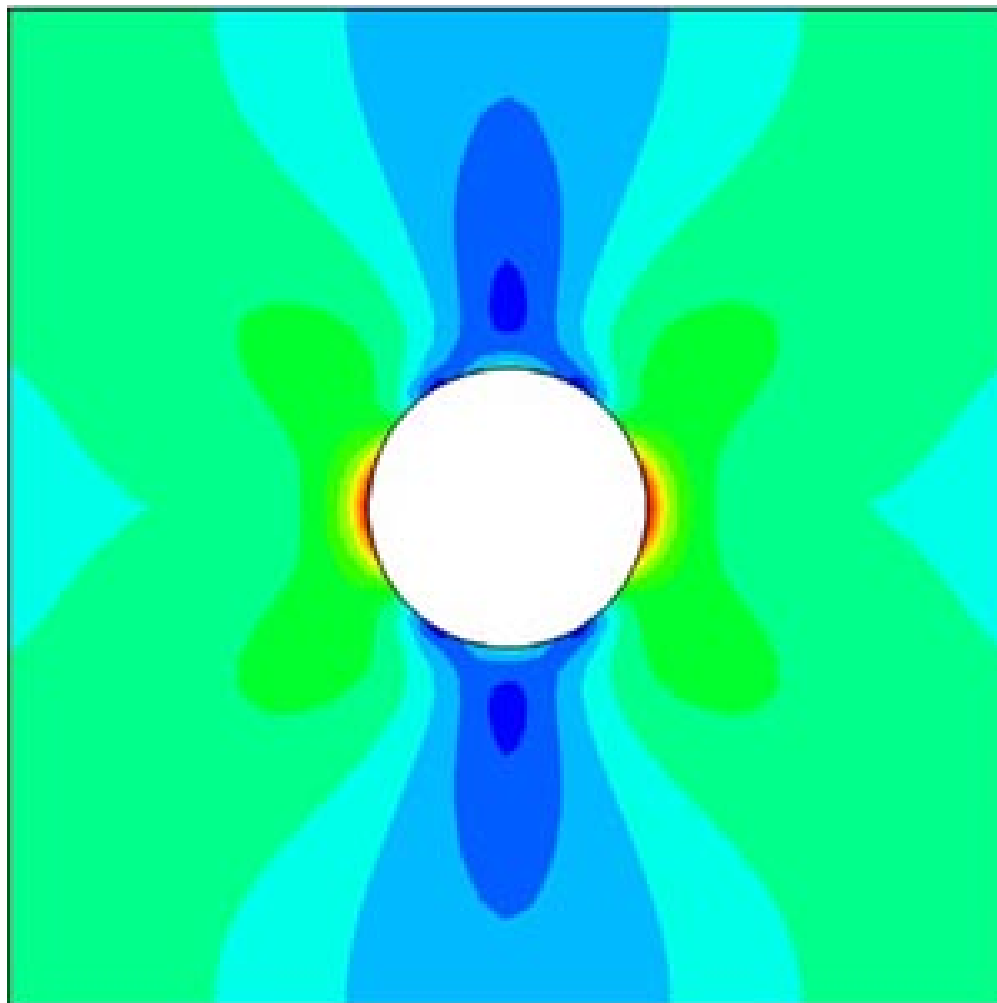
Faculté des sciences et de génie
Département de génie des mines,
de la métallurgie et des matériaux

Document pédagogique interactif d'aide à la résolution de
l'examen du mardi 13 novembre 2007

Matériau de l'ingénieur
GML-10463

Ce document a été rédigé par Frédéric Couët et Sébastien Meghezi à la session d'automne 2008 à partir des examens du cours Matériau de l'Ingénieur de la session d'automne 2007.

1. Examen du mardi 13 novembre 2007



Concentration de contrainte autour d'un trou (image tirée de [www. colorado. edu](http://www.colorado.edu))

« La relation structure matière,
Quelle galère ! »

*Instructions*

Voici la démarche à suivre afin de bénéficier au mieux de tous les apports pédagogiques de ce document.

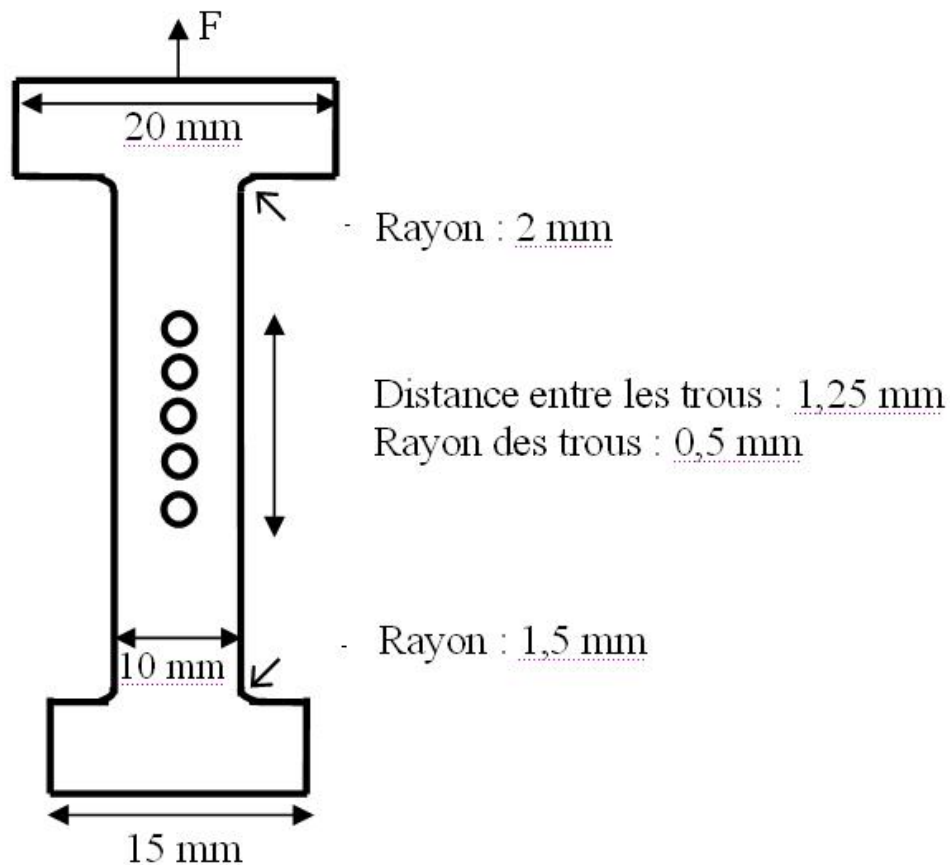
Dans une première partie, vous trouverez l'ensemble de l'énoncé de l'examen.

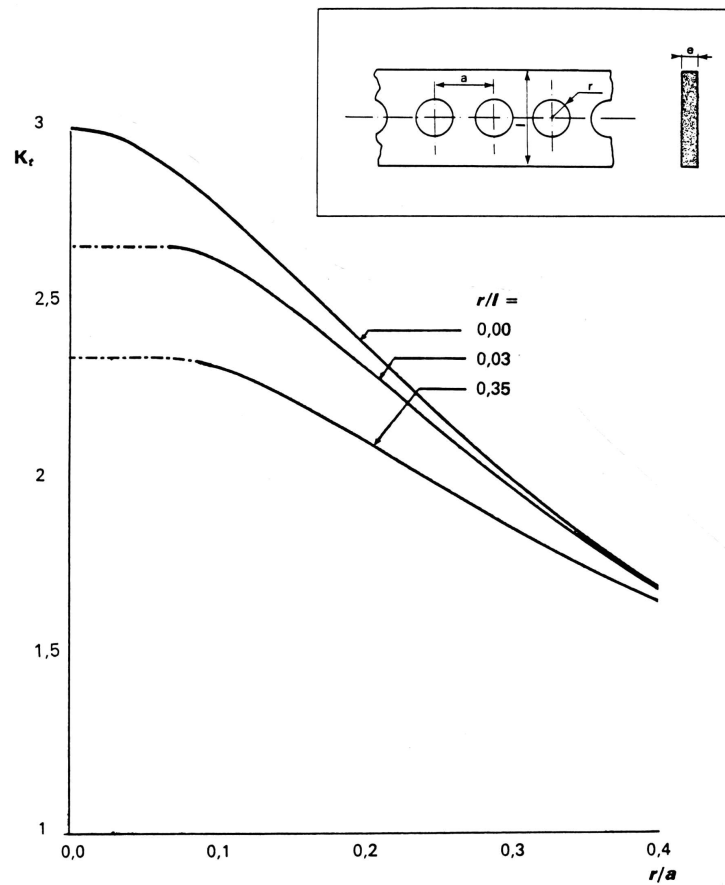
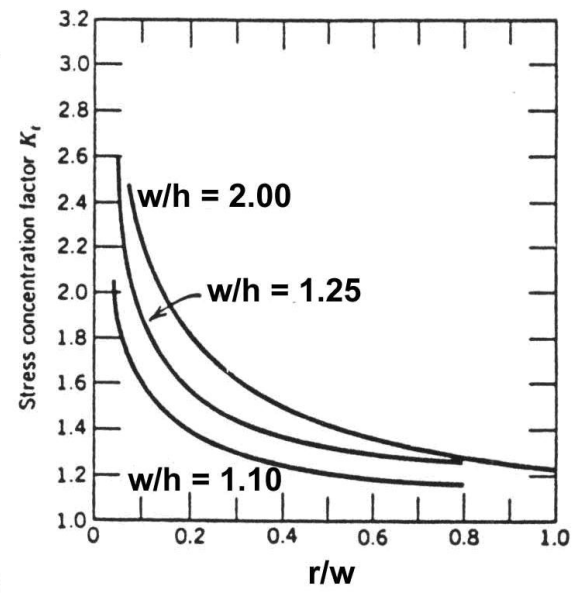
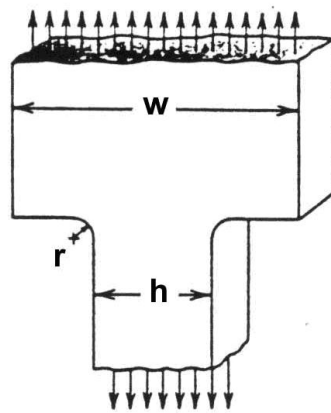
Pour chaque problème rencontré, il est recommandé d'essayer de le résoudre en ayant le livre comme seul outil. Pour certains problèmes, vous trouverez des jeux-questionnaires ou des questions ouvertes. Pour participer au jeux-questionnaires (et donc vous amuser en apprenant!) vous devez cliquer sur « Débuter le quiz ». Vous pouvez ensuite sélectionner vos réponses, puis cliquer sur « Terminer le quiz ». Votre note sera alors affichée et vous pourrez cliquer sur « Réponses » pour obtenir les corrections. De la même façon, inscrivez vos réponses dans les rectangles noirs tout au long du document et tapez « Entrer ». Le rectangle devient vert lorsque la réponse est exacte et rouge si elle est fausse.

Chaque problème présent dans ce document est construit selon le même principe. En cliquant sur le numéro du problème, vous serez redirigés vers la deuxième partie de ce document qui correspond à la correction complète du problème. Cette correction n'est pas exhaustive, mais comporte l'ensemble des éléments de réponse attendus. A la fin de chaque correction, une flèche vous ramènera à l'énoncé du problème en question.

Bonne pratique !

Problème 1.1. Vous utilisez une pièce pour supporter une charge. Afin d'alléger cette pièce, illustrée à la figure suivante, vous décidez de percer des trous. Déterminez la force maximale (F) supportée par cette pièce avant l'apparition de la déformation plastique ainsi que l'endroit probable d'une éventuelle cassure. La limite conventionnelle d'élasticité pour ce matériau est de 200 MPa et l'épaisseur de la pièce est de 2 mm. Justifiez votre réponse.





Problème 1.2.

Commentez l'affirmation suivante. L'essai CHARPY fournit une valeur de l'énergie de rupture parce que la hauteur atteinte par le pendule est d'autant plus faible que le matériau est tenace.

*Indice¹ : La ténacité est la capacité d'un matériau à emmagasiner de
avant sa .*

*Cette énergie correspond à sous la courbe contrainte-
déformation.*

Problème 1.3.

Une tôle épaisse présente une fissure. Faites une suggestion pour arrêter la progression de cette fissure. Justifiez votre réponse.

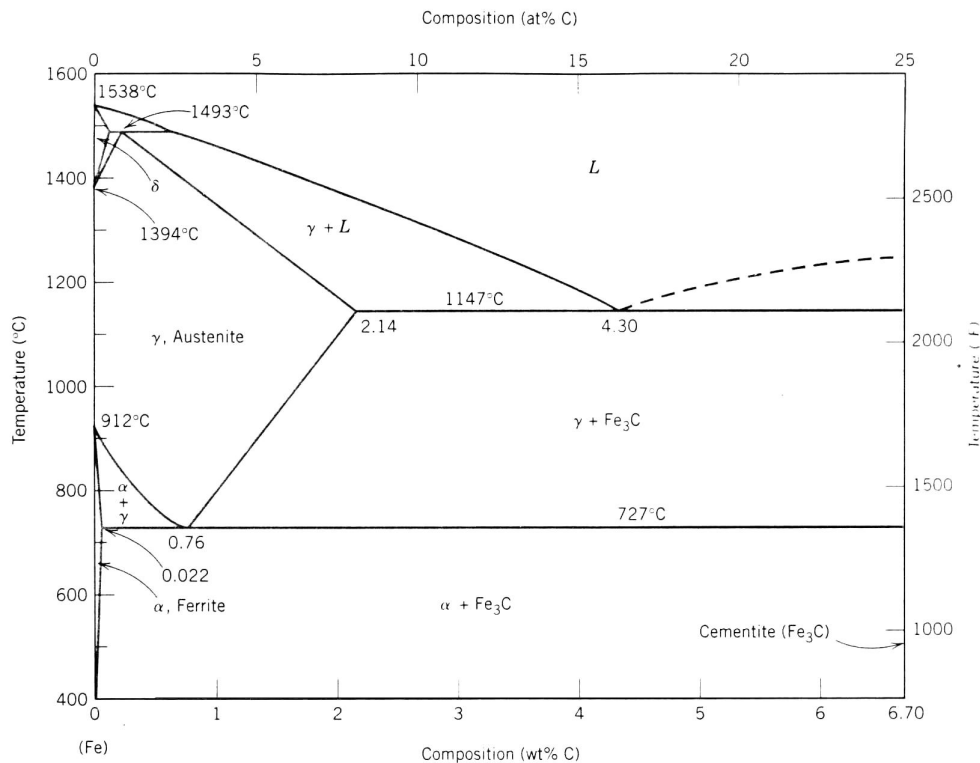
1. Cet indice, qui n'était pas dans l'examen initial, vous a été donné afin que vous remarquiez qu'il est important, dans ce genre d'exercice, de rappeler la définition des termes employés.

Problème 1.4. Tracez de façon schématique la courbe contrainte-déformation correspondant à un essai de traction effectué à la température de la pièce et à la température de l'azote liquide (-196°C) pour le cuivre (CFC), un acier à faible carbone (CC) et le zinc (HC). Discutez brièvement.

Problème 1.5. Précisez les facteurs pouvant conduire à un comportement ductile ou fragile des matériaux. Discutez.

Problème 1.6. Définissez la fatigue. Pourquoi l'état de surface influence-t-il le comportement en fatigue ?

Problème 1.7. La figure suivante présente le diagramme d'équilibre Fe- Fe_3C :



A) À l'aide du diagramme Fe-C :

- indiquez la solubilité et la température maximales du carbone dans l'austénite (γ).
- précisez les compositions en carbone du fer α , de l'eutectique et de l'eutectoïde.
- définissez les points eutectique et eutectoïde.

B) Un acier contient 96% d'austénite et 4% de Fe_3C à 800°C. Estimez la teneur en carbone de cet acier. Dessinez le médaillon représentant sa microstructure.

C) Déterminez la composition et le pourcentage en poids de cémentite (Fe_3C) lorsque nous avons :

- un acier à 0,4% en poids de carbone à 723°C dans la zone $\gamma + Fe_3C$.
- une fonte de 2,7% en poids de carbone à une température 0,5°C inférieure à la température eutectique (zone $\gamma + Fe_3C$)

Problème 1.8. Un petit fil d'acier 1080 est traité thermiquement. Voici les courbes TTT d'un acier 1080.

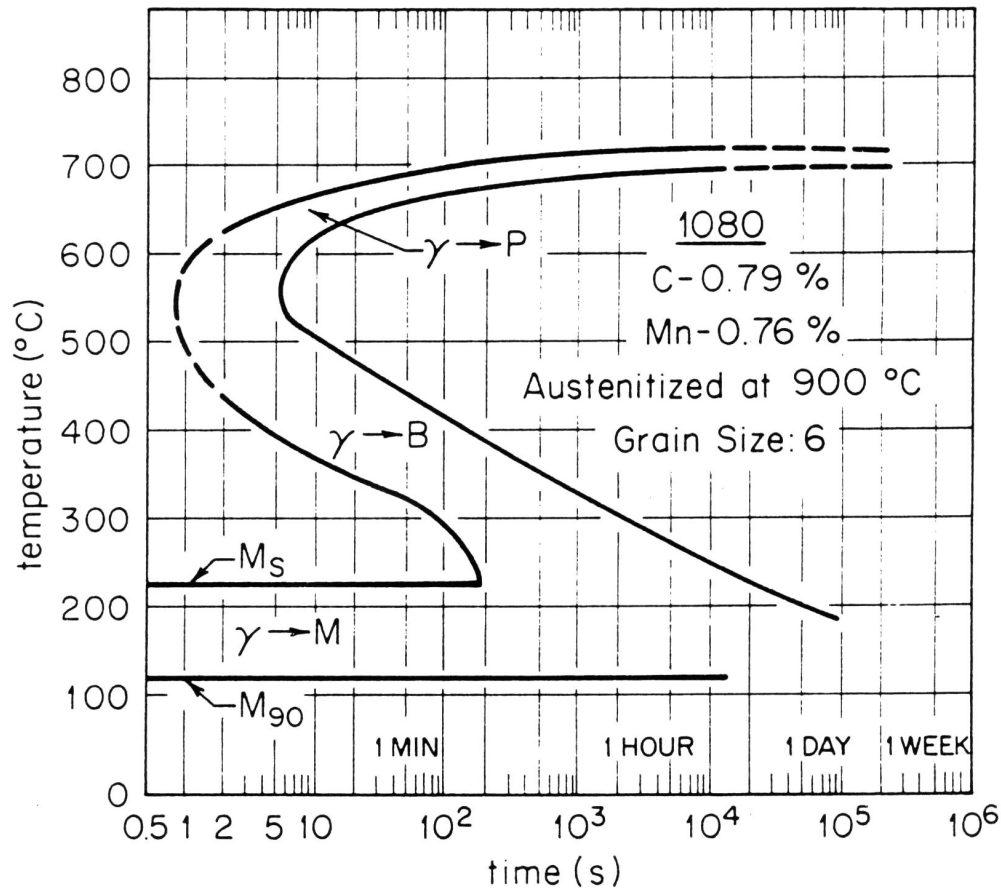


Diagramme TTT de l'acier 1080

Nommez et illustrez la structure finale obtenue lorsqu'on soumet la petite pièce à la série des traitements suivants. Fournissez toute les informations que vous pouvez.

- Chauffage à 805°C, maintien 1 heure, trempe à 600°C, maintien 10 s, trempe à l'eau.
- Chauffage à 730°C, maintien 1 heure, trempe à 400°C, maintien 20 s, trempe à l'eau.
- Chauffage à 790°C, maintien 1 heure, trempe à 300°C, maintien 500 s, trempe à l'eau.

Problème 1.9. Quelles seront la structure et la dureté d'une petite pièce d'acier 1080 trempée à 650°C à partir de la région austénitique (800°C), gardée à 650°C pendant 10 secondes, trempée à 450°C , maintenue à cette température pendant 5 secondes, et finalement trempée à l'eau ?

Solutions aux Exercices

Problème 1.1.

Il s'agit d'un problème de concentration de contraintes. L'endroit où sera observée la première déformation plastique est l'endroit sur la pièce où la contrainte locale appliquée atteindra et dépassera la limite élastique de 200 MPa. On identifie trois endroits où la pièce est susceptible de briser en premier : l'arrondi du haut, l'arrondi du bas et les trous. Pour chacun de ces endroits, nous allons calculer la force que peut soutenir la pièce sans qu'il y ait de déformations plastiques.

La contrainte maximale près de l'arrondi (σ_{locale}^{max}) correspond à la contrainte réellement appliquée (σ_0) multipliée par le facteur de concentration de contrainte (K_t). La contrainte maximale ne doit pas dépasser la limite élastique (σ_y).

$$\sigma_{locale}^{max} = \sigma_0 K_t \leq \sigma_y \quad (1)$$

Mais il faut distinguer la contrainte maximale (σ_{locale}^{max}) ressentie par le matériau, due à la zone de concentration de contrainte, de la contrainte maximale (σ_0^{max}) que l'on peut appliquer au matériau avant que ne débute la déformation plastique. σ_0^{max} correspond donc à la valeur de σ_0 pour laquelle $\sigma_{locale}^{max} = \sigma_y$.

$$\sigma_0^{max} = \frac{F_{max}}{A} = \frac{\sigma_y}{K_t} \quad (2)$$

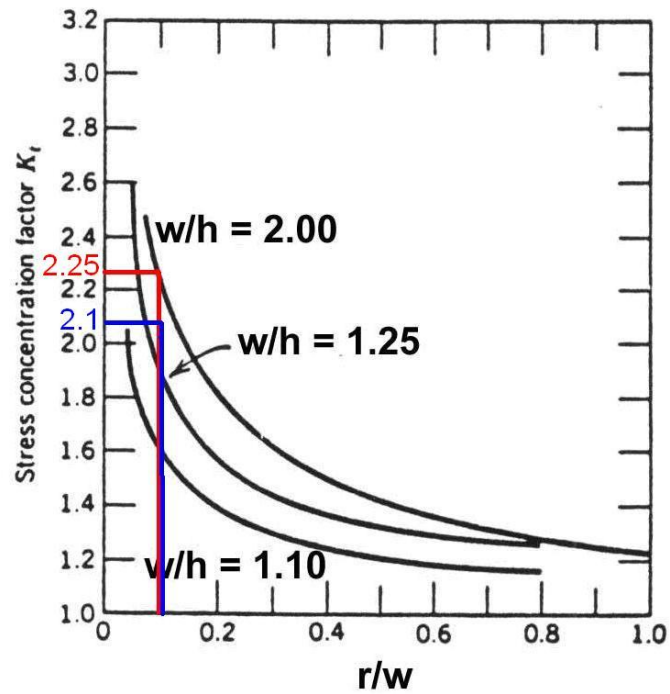
A correspond à l'aire de la section du matériau. La force maximale (F_{max}) que l'on peut exercer sur celui-ci avant que ne se produise une déformation plastique est donc donnée par :

$$F_{max} = \frac{A \times \sigma_y}{K_t} \quad (3)$$

Nous devons donc déterminer les facteurs de concentration de contrainte pour les zones à risques. A l'aide des dimensions des trous et des arrondis fournies dans l'énoncé, nous pouvons remonter aux facteurs de concentration de contrainte par simple lecture graphique

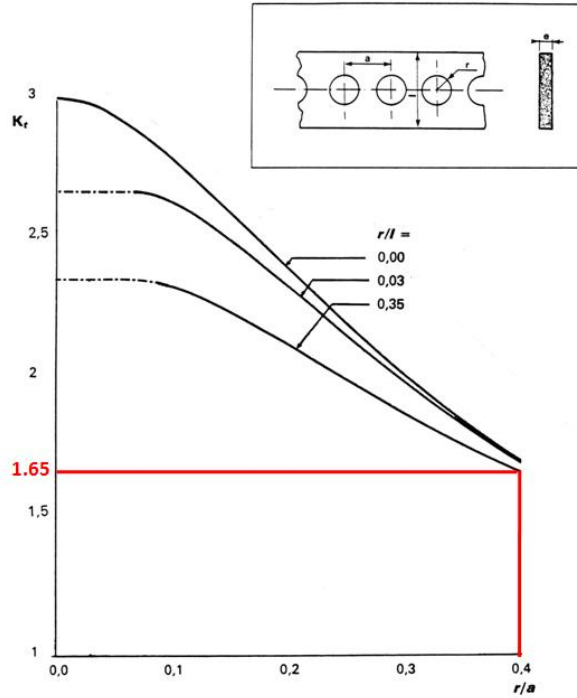
Pour les deux arrondis (arrondi du haut noté 1 et arrondi du bas noté 2) :

1. $w/h = 20/10 = 2$
 $r/w = 2/20 = 0.1$
2. $w/h = 15/10 = 1.5$
 $r/w = 1.5/15 = 0.1$



Remarque : Le point de coordonnées (0.1, 2.1) a été obtenu par extrapolation des courbes correspondant aux rapports $\frac{w}{h}$ respectivement de 1.25 et 2.00.

Pour les trous :



Nous obtenons donc :

$$K_t^{Haut} = 2.25 \quad (4)$$

$$K_t^{Bas} = 2.1 \quad (5)$$

$$K_t^{Trous} = 1.65 \quad (6)$$

Maintenant que nous avons déterminé les facteurs de concentration de contrainte, on calcule pour chaque site à risque de la pièce la force permise pour ne pas dépasser la limite élastique.

$$F_{max}^{Haut} = \frac{(0.01 \times 0.002) \times 200 \times 10^6}{2.25} \frac{[m][m][Pa]}{[-]} = 1777 \text{ N} \quad (7)$$

$$F_{max}^{Bas} = \frac{(0.01 \times 0.002) \times 200 \times 10^6}{2.1} = 1905 \text{ N} \quad (8)$$

Pour le calcul de la force au niveau des trous, il faut faire attention au calcul de l'aire ! On doit soustraire l'aire des trous et donc

$$A = (\text{Largeur de la pièce au niveau des trous} - \text{largeur des trous})(\text{épaisseur de la pièce})$$

$$A = (0.01\text{m} - 0.001\text{m})(0.002\text{m}).$$

$$F_{max}^{Trous} = \frac{((0.01 - 0.001) \times 0.002) \times 200 \times 10^6}{1.65} \quad (9)$$

$$F_{max}^{Trous} = 2182 \text{ N} \quad (10)$$

Nous pouvons donc conclure que la force maximale que peut supporter la pièce avant qu'elle ne commence à se déformer plastiquement est de 1777 N. Pour une telle force la déformation plastique s'amorcera en premier lieu au niveau de l'arrondi du haut.



Problème 1.2.

Selon votre livre, la ténacité est la capacité d'un matériau à absorber de l'énergie (élastique et plastique) avant sa rupture. L'essai Charpy est discuté à la section 8.6 du livre de cours.

Essentiellement, plus le matériau est tenace, plus l'énergie de rupture est élevée, donc le pendule remontera moins haut après avoir brisé la pièce. L'énergie de rupture (E) correspond à la différence d'énergie potentielle du pendule entre sa hauteur de départ (h) et la hauteur atteinte après la rupture (h').

$$E = mg(h - h') \quad (11)$$

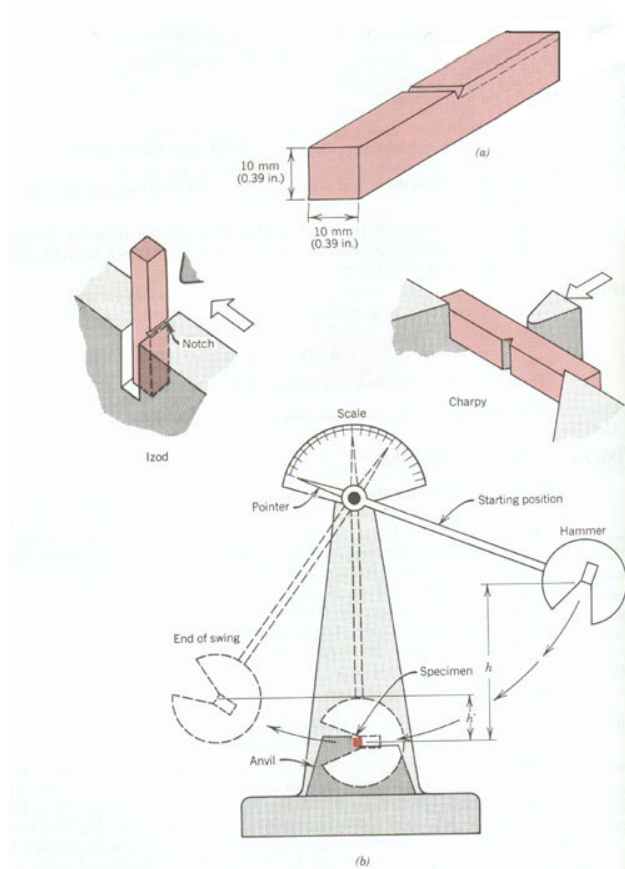


Image tirée de : http://www.sv.vt.edu/classes/MSE2094_NoteBook/97ClassProj/analyue/energy.html

Vous pouvez visionner un vidéo d'essai Charpy tiré de <http://www.rose-hulman.edu/ES204/PDFs/charpy.mpg> :



Problème 1.3.

Les principes de la mécanique de la rupture sont abordés au chapitre 8.5 du livre.

Une rupture se produit lorsque la contrainte appliquée est supérieure à une certaine valeur critique σ_c . On peut définir un facteur critique d'intensité de contrainte (K_c) comme :

$$K_c = Y(a, W)\sigma_c\sqrt{\pi a} \quad (12)$$

avec Y un paramètre adimensionnel qui dépend de la taille de la fissure (a) et de la largeur de la pièce (W). Ce facteur d'intensité de contrainte (K_c) dépend donc de la géométrie de la fissure ainsi que de la façon d'appliquer la charge.

La contrainte critique s'exprime comme :

$$\sigma_c = \frac{K_c}{Y(a, W)\sqrt{\pi a}} \quad (13)$$

Lorsqu'une microfissure est relativement longue et que le rayon de courbure à son extrémité est faible, on peut écrire :

$$\sigma_{max} = 2\sigma_0 \left(\frac{a}{r}\right)^{1/2} \quad (14)$$

Si l'on veut diminuer la contrainte près du trou de telle sorte que $\sigma_{max} \leq \sigma_c$, on peut percer un trou à l'extrémité de la fissure de sorte à en augmenter le rayon de courbure (si $r \nearrow$, alors $\sigma_{max} \searrow$). De cette manière, les contraintes diminueront et la propagation de la fissure pourra être freinée.



Problème 1.4.

Afin de construire les courbes σ - ϵ , il faut prendre en compte l'évolution de différents paramètres avec la température :

- Il faut montrer que tous les matériaux subissent une transition fragile-ductile plus ou moins prononcée. Ainsi, à $T = -196^\circ\text{C}$, tous les matériaux étudiés sont fragiles et aucun d'entre eux ne devrait subir de déformation plastique importante.

Cependant, l'importance de la transition fragile-ductile d'un matériau dépend de sa structure cristalline. Ainsi, une structure cristalline CFC confère au matériau un caractère plus ductile, car il possède de nombreux plans de glissement (12). C'est la raison pour laquelle on observe une importante déformation plastique du cuivre (CFC) à température ambiante et encore une légère ductilité même à basse température. Inversement, les métaux à structure hexagonale compacte sont habituellement assez fragiles, car ils possèdent peu de systèmes de glissement actifs (3-6, voir figure 1.4 et p.140, 141 et 181 du livre).

- Il faut noter que, de manière générale, la rigidité des matériaux est plus faible lorsque la température augmente.
- Il faut également montrer que l'acier est plus rigide que le cuivre et le zinc. Pour cela, il faut accentuer la pente de la partie linéaire de la courbe σ - ϵ de l'acier. De la même manière, le module élastique du cuivre est supérieur à celui du zinc.

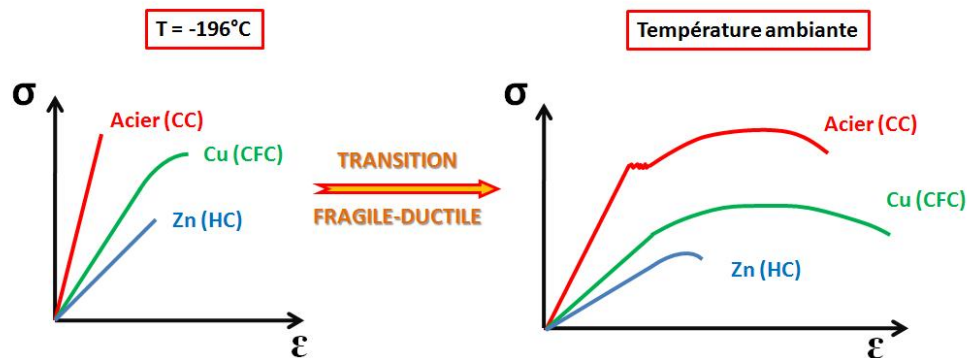


Figure 1.4 : Transition fragile-ductile dans le cuivre, le zinc et l'acier.

Problème 1.5.

Voici quelques exemples de facteurs à considérer pour évaluer la fragilité ou la ductilité d'un matériau :

- La température : en général, plus la température augmente, plus un matériau devient ductile.
- L'état de valence : le type de liaisons chimiques constituant un matériau détermine le type de rupture qu'il subira. Un matériau présentant des liaisons à prédominance ionique ou covalente sera plutôt fragile du fait du caractère localisé de ce type de liaisons (et directionnel dans le cas des liaisons covalentes), alors que la prédominance métallique confèrera au matériau un caractère plus ductile. En effet, la nature isotropique et délocalisée de ces derniers types de liaisons font qu'elles sont plus faciles à rompre et à reformer (voir les différents types de liaisons p.18-21 du livre).
- Présence de dislocations : Il faut se rappeler que la capacité d'un métal à acquérir une déformation plastique varie selon la capacité des dislocations à se déplacer. Tout ce qui constituera un frein au déplacement des dislocations sera également un frein à la déformation plastique et rendra alors le matériau plus fragile. C'est pourquoi, plus un matériau aura un nombre important de dislocations et des grains de grande taille (un joint de grain freine le déplacement des dislocations), plus il aura un caractère ductile. Inversement, les impuretés seront autant de freins au déplacement des dislocations et

renforceront le caractère fragile d'un matériau. C'est le cas par exemple d'un acier à haute teneur en C et dont la dureté et la résistance est plus importante.

En vertu de ce qui vient d'être dit, on en déduit que :

- Plus la vitesse d'application de la contrainte augmente, plus le caractère fragile du matériau est renforcé (les dislocations ont moins le temps de se déplacer).
- La structure cristallographique : plus le nombre de plans de glissement d'un matériau augmente, plus celui-ci est ductile (déplacement facilité des dislocations selon les plans de glissement).

Règle élémentaire à retenir :

Toute restriction ou entrave imposée au déplacement des dislocations confère à un matériau une dureté et une résistance accrues (voir p.146-147 du livre, à noter que la présence de dislocations est influencée par l'histoire thermique subie par le matériau).



Problème 1.6.

La fatigue correspond à la défaillance brutale qui se produit dans une structure soumise à une longue période de cycles de contraintes dynamiques et variables. Ce nombre de cycles (n) est généralement très grand et la contrainte appliquée est généralement faible par rapport à la limite d'élasticité ou à la résistance à la traction du matériau ($\sigma < R_{e0.2}, \sigma_M$).

La durée de vie d'un matériau soumis à la fatigue est étroitement liée à l'état de la surface. Toute irrégularité ou défaut de surface peut résulter en une concentration de contraintes qui engendrera l'amorçage et la propagation d'une fissure.

Des traitements de surface tels que le polissage, le grenaillage et la cémentation permettent d'améliorer la résistance à la fatigue des matériaux.



Problème 1.7.

A)

a)

Cette question peut être interprétée de 2 manières différentes, donc 2 types de réponses peuvent être acceptées :

- Si la question est de déterminer la solubilité maximale du carbone dans l'austénite et d'indiquer la température qu'il faut atteindre pour obtenir cette solubilité, la réponse est :

composition : 2.14 wt% de C pour une température de 1147°C (voir point 1 de la figure 1.7B)

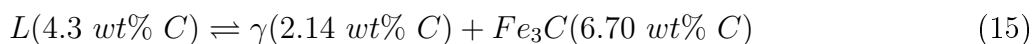
- Si la question était de déterminer la solubilité maximale du carbone dans l'austénite et d'indiquer la température maximale que peut atteindre une phase austénitique, la réponse est :

composition : 2.14 wt% de C pour une température de 1493°C (voir point 1 de la figure 1.7B.)

b) et c)

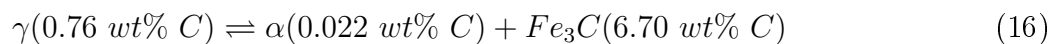
Le point eutectique correspond aux conditions de composition et de température pour lesquelles l'alliage passe d'une phase liquide à deux phases solides par refroidissement. Ce point est identifié par la lettre E sur le diagramme de phase (voir figure 1.7B).

En ce point la transition de phase est la suivante :



Le point eutectoïque correspond aux conditions de composition et de température pour lesquelles l'alliage passe d'une phase solide à deux phases solides par diminution de température. Ce point est identifié par la lettre E sur le diagramme de phase (voir figure 1.7B).

En ce point, la transition de phase est la suivante :



B)

La teneur en C d'un acier contenant 96% d'austénite et 4% de Fe_3C à 800°C est de 1,24 wt% (voir point 2 de la figure 1.7B). Le médaillon de sa microstructure est représentée en figure 1.7A.

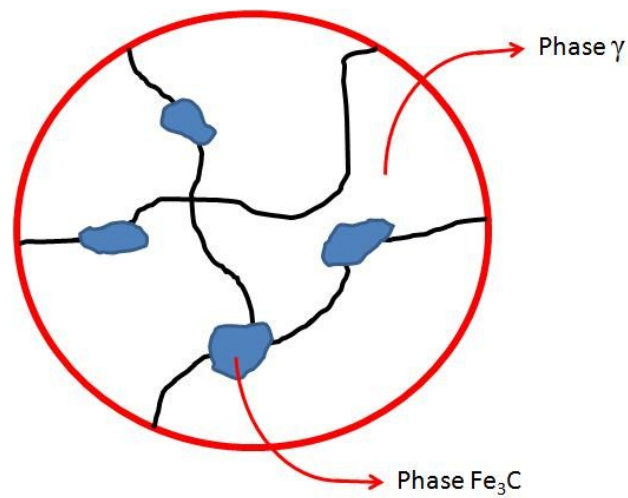


Figure 1.7A : Médaille de la microstructure d'un acier contenant 96% d'austénite et 4% de Fe_3C .

C)

a) un acier à 0.4 wt% de carbone et porté à $723^{\circ}C$ dans la zone $\alpha + Fe_3C$ est composé à 95 wt% d'une phase α (avec une teneur en carbone légèrement inférieure à 0.022 wt%) et de 5 wt% d'une phase Fe_3C avec 6.7 wt% C (voir point 3 de la figure 1.7B). Le pourcentage en poids de cémentite (Fe_3C) est donc de 5%.

b) une fonte de 2,7 wt% en poids de carbone porté à une température de $1146,5^{\circ}C$ (zone $\gamma + Fe_3C$) est composée à 87,5 wt% d'une phase γ (2.14 wt%C) et de 12.5 wt% d'une phase Fe_3C (6.7 wt%C) (voir point 4 de la figure 1.7B). Il y a donc 12.5 wt% de cémentite.

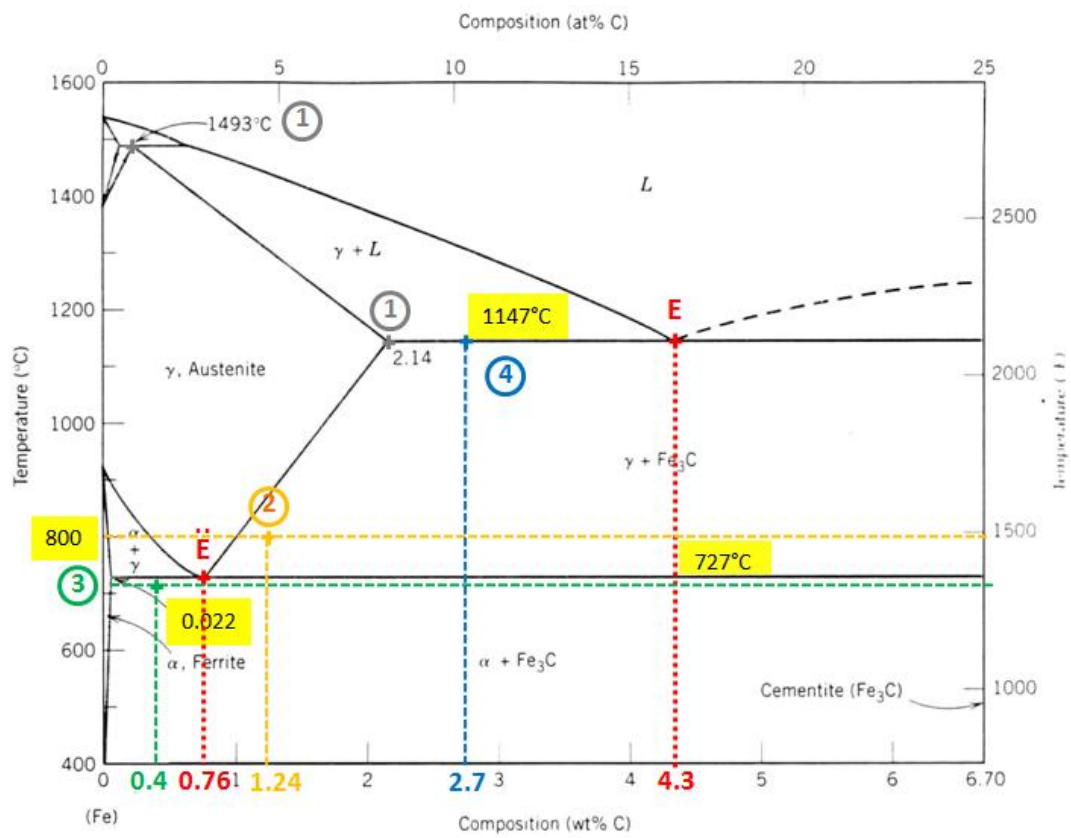
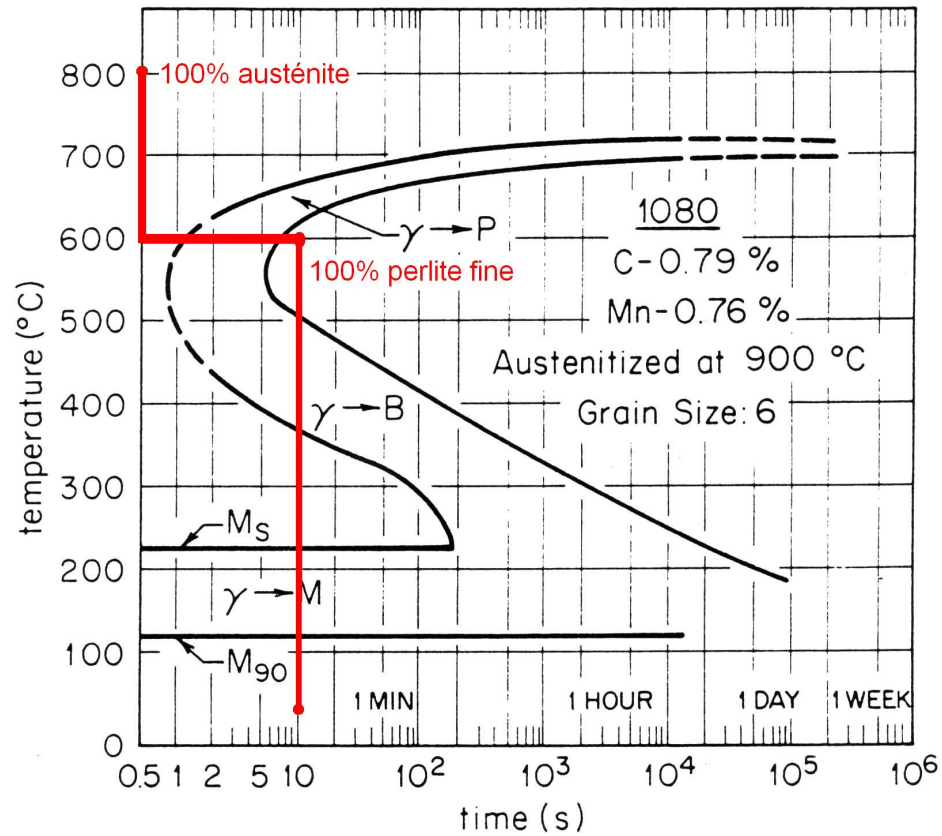
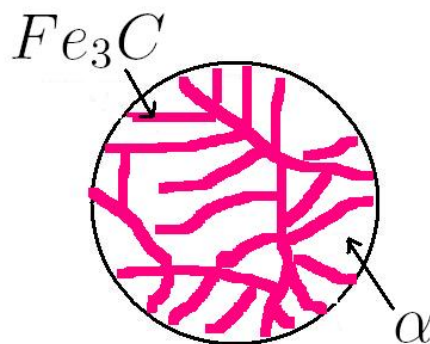


Figure 1.7B : Diagramme de phase Fe-C.

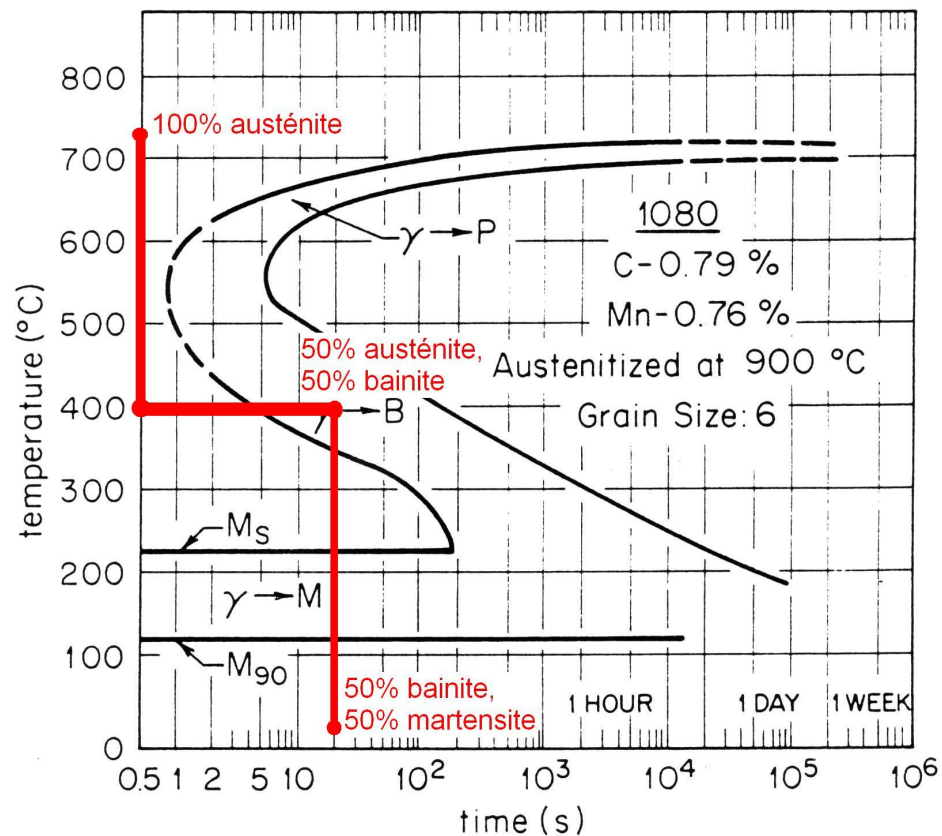
i)



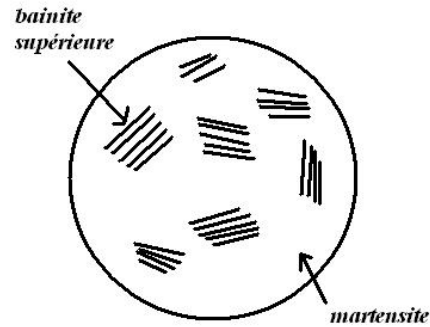
La première étape de chauffage, à 805°C pendant 1 heure, permet de s'assurer que la pièce est entièrement composée d'austénite. Durant la trempe à 600°C, 100% de l'austénite est transformée en perlite fine. Voici un aperçu de la microstructure de la pièce :



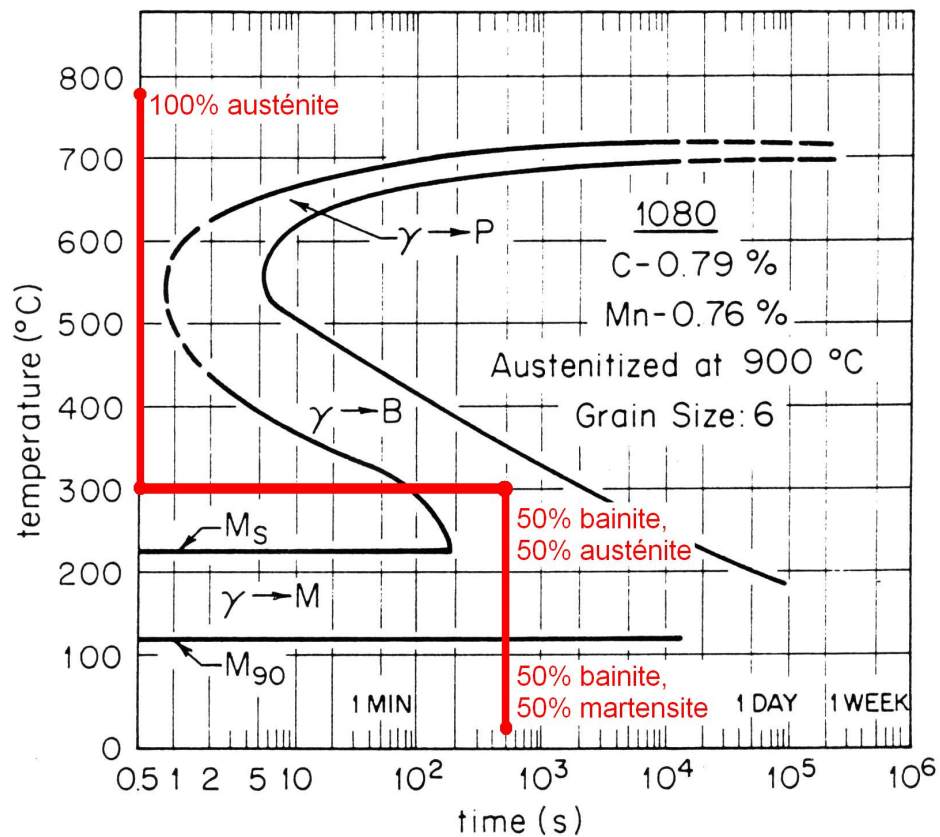
ii)



Suite à la première étape de chauffage à 730°C pendant 1 heure, la pièce d'acier se trouve entièrement en phase austénitique, phase à partir de laquelle les transformations de phase auront lieu. La trempe à 400°C pendant 20 secondes permet le changement de phase d'environ 50% de l'austénite en bainite supérieure (phase rencontrée lorsque la température est comprise entre 300°C et 540°C, voir p. 267 du livre). La trempe à l'eau transforme ce qui reste de l'austénite en martensite. La composition finale de la pièce est donc de 50% de bainite supérieure et de 50% de martensite. Le microstructure devrait ressembler à ceci :

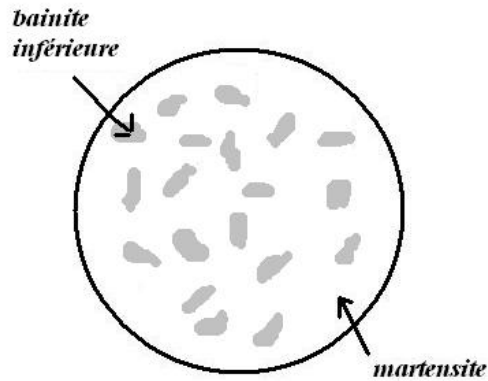


iii)

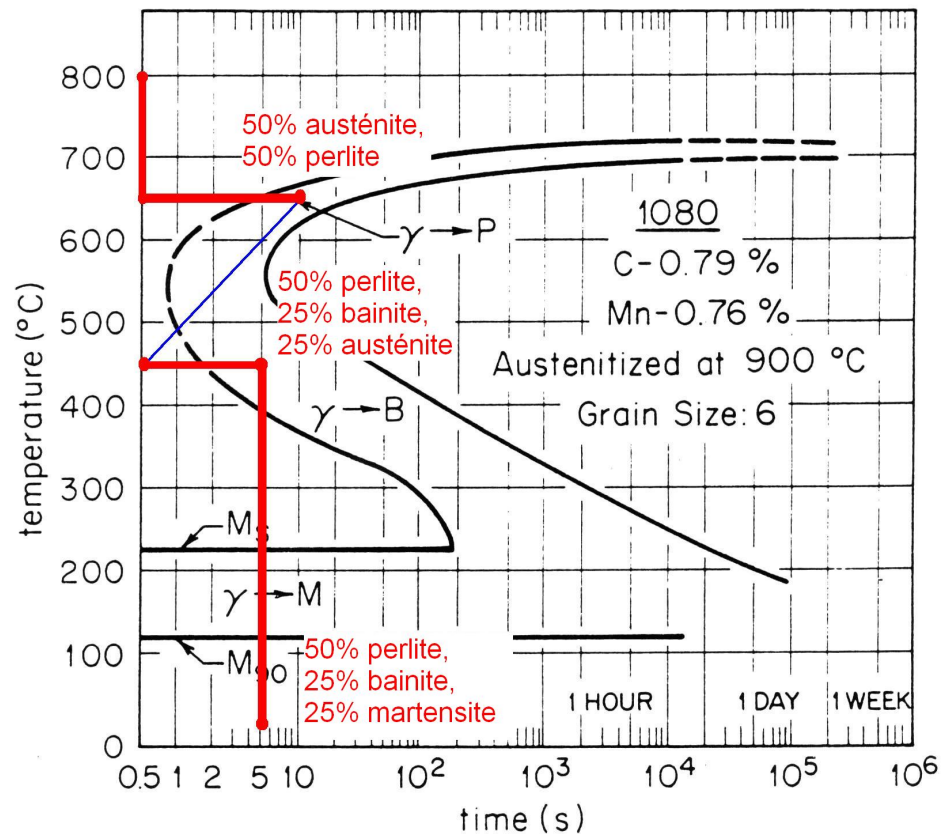


L'étape de chauffage à 790°C pendant 1 heure permet d'avoir de l'austénite. La première trempe à 300°C pendant 500 secondes permet à 50% de l'austénite de se transformer en bainite inférieure (phase rencontrée lorsque la température est comprise entre 200°C et 300°C, voir p.267 du livre). La trempe à l'eau permet de transformer ce qui reste d'austénite en martensite. La composition finale de la pièce est alors de 50% en bainite inférieure et de 50%

en martensite.

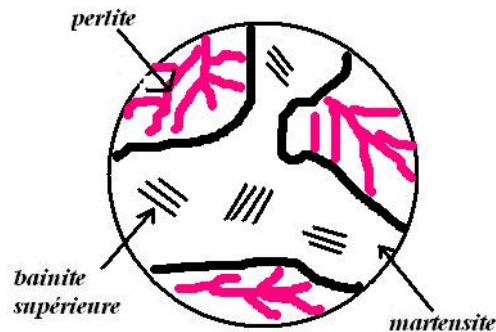


Problème 1.9.



On chauffe la pièce jusque dans la région austénitique. La pièce est ensuite placée à 650°C pendant 10 secondes ce qui permet de produire environ 50% de perlite. La pièce est ensuite

trempe² à 450°C et maintenue à cette température pendant 5 secondes. Environ 50% de l'austénite est transformée en bainite supérieure. À ce moment, la composition totale de la pièce est de 50% de perlite, 25% de bainite et 25% d'austénite. La trempe finale permet de transformer l'austénite restante en martensite. On a donc 50% de perlite, 25% de bainite et 25% de martensite. La microstructure finale a l'apparence suivante :



2. Pendant la période de transition où la pièce passe de 650°C à 450°C, la quantité d'austénite se transformant en bainite est très faible, voire nulle, même si la courbe de refroidissement passe dans les régions du diagramme correspondant à la bainite et à la perlite. Une fois à 450°C, on cherche à nouveau à prédire la transformation de phase de l'austénite. La lecture du temps sur le graphique doit alors être reprise au temps 0. Pour plus d'information, référez-vous au problème type 10.1 du livre.