

BREVET DE TECHNICIEN SUPERIEUR

TRAITEMENTS DES MATERIAUX

SCIENCES PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Sous-épreuve spécifique à chaque option

Option A : Traitements Thermiques

- U4.3A -

SESSION 2014

Durée : 2 heures

Coefficient : 2

Matériel autorisé :

- Toutes les calculatrices de poche y compris les calculatrices programmables, alphanumériques ou à écran graphique à condition que leur fonctionnement soit autonome et qu'il ne soit pas fait usage d'imprimante (Circulaire n°99-186, 16/11/1999).

Documents à rendre avec la copie :

- Annexe 1.....page 10/11
- Annexe 2.....page 11/11

Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il soit complet.
Le sujet comporte 11 pages, numérotées de 1/11 à 11/11.

Exercice 1 - Trempe LASER – 13,5 points

Les questions sont indépendantes les unes des autres. Elles peuvent être traitées séparément.

Document 1 :

Auparavant les bielles étaient fabriquées en deux morceaux qui étaient ensuite assemblés et vissés : le contact n'était pas parfait et les vis fatiguaient rapidement en flexion pour finalement casser.

Une solution ingénieuse a été imaginée. La bielle est fabriquée en un seul bloc puis elle est cassée nettement en deux morceaux selon une rupture fragile. Les deux morceaux seront parfaitement ajustés lors du vissage autour du vilebrequin.



Figure 1 : Bielle sécable ; www.vcr-i.com

Pour réussir un tel exploit, on réalise, dans un premier temps, ce qu'on appelle industriellement une trempe LASER à l'endroit précis qu'on souhaite casser.

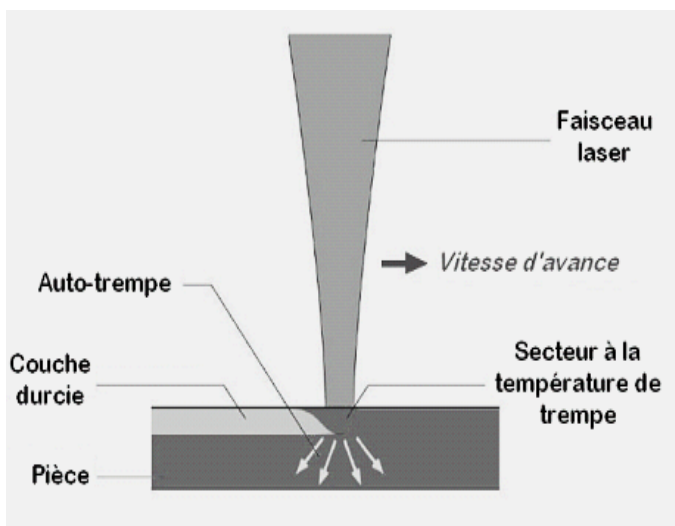


Figure 2

Ce traitement thermique consiste en un chauffage superficiel de la pièce par un faisceau LASER à une température supérieure à la température d'austénitisation T_a sans atteindre la fusion.

Juste après le passage du LASER, le refroidissement très rapide de la zone irradiée par conduction thermique dans la masse de la pièce permet la transformation martensitique de l'acier.

Document 2 : Les LASER

« Contrairement à la lumière du Soleil, la lumière LASER est monochromatique et très directionnelle : on peut la guider sur de longues distances et obtenir des puissances phénoménales. »

D'après www.espace-sciences.org

Document 3 : Les pyromètres

Les pyromètres ISR 12-LO et IGAR 12-LO sont des pyromètres bichromatiques digitaux de haute précision avec fibre optique, pour la mesure de température sans contact entre 300 et 3300°C.

Les pyromètres mesurent d'après le principe bicolore (principe de rapport), selon lequel deux longueurs d'ondes voisines sont utilisées pour la détermination de la température.

Cette technique présente des avantages par rapport aux pyromètres monochromatiques : dans de nombreux domaines la mesure de température devient indépendante de l'émissivité et insensible à la taille de la zone mesurée.

Bandes spectrales : ISR 12-LO: λ_1 : 0,8 μm / λ_2 : 1,05 μm
 IGAR 12-LO: λ_1 : 1,52 μm / λ_2 : 1,64 μm

extrait du manuel d'utilisation des pyromètres IMPAC

1.1. La martensite

1.1.1. Quelle particularité de la martensite est recherchée dans cette application ?

1.2. Le LASER

1.2.1. Quelles sont parmi les caractéristiques du LASER (**document 2**) celles qui sont recherchées pour l'application étudiée?

1.2.2. On utilise un LASER au dioxyde de carbone émettant à la longueur d'onde $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$.

1.2.2.1. Rappeler les limites du domaine des longueurs d'onde du spectre de la lumière visible.

1.2.2.2. A quel domaine spectral appartient la radiation émise par le LASER CO₂ ?

1.2.2.3. Le faisceau lumineux du LASER est caractérisé par un cône de demi-angle au sommet β et par un « waist » w_0 .

Le terme anglais « waist » désigne ici le col d'étranglement de section circulaire de rayon w_0 .

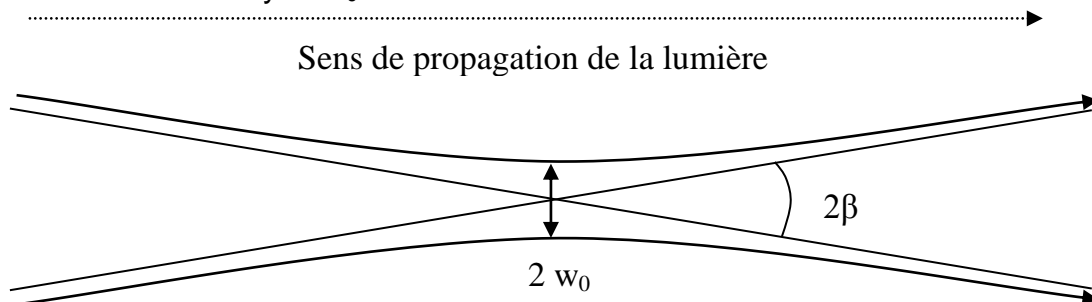


Figure 3

On a la relation $\beta = \frac{180 \times \lambda}{\pi^2 \times w_0}$ avec β en degrés. λ et w_0 sont en unités SI.

Dans notre cas : $w_0 = 0,50$ mm.

Calculer β avec deux chiffres significatifs.

1.2.2.4. Quelle caractéristique citée dans le **document 2** confirme-t-elle ce calcul de β ?

1.2.3. Le LASER émet un rayonnement de puissance $P = 310$ W.

1.2.3.1. La densité de puissance J_{Laser} est donnée par la relation :

$$J_{\text{LASER}} = \frac{P}{S}$$

Calculer sa valeur au niveau du « waist » de rayon w_0 .

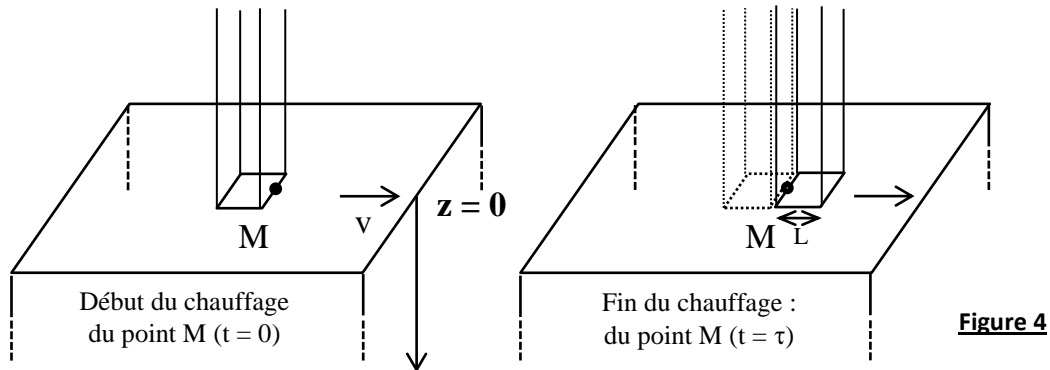
1.2.3.2. Quelle affirmation du **document 2** est-elle illustrée par la valeur de J_{Laser} ? A titre de comparaison, le flux lumineux solaire reçu au sommet de l'atmosphère vaut 1340 W.m^{-2} .

1.3. La trempe LASER

1.3.1. Phase de chauffage

Le faisceau LASER incident est maintenant supposé de section carrée de côté $L = 500 \mu\text{m}$. Sa densité de puissance J_{Laser} est constante sur toute la section du faisceau. Un robot déplace le faisceau à la vitesse v et un point de la surface traitée est donc chauffé pendant la durée τ durant laquelle il se trouve sous le faisceau (**figure 4**).

On note $\theta(z,t)$ la température en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$) à la profondeur z à l'instant t .
 On prend $z = 0$ à la surface de la pièce.
 On suppose que le transfert d'énergie se fait uniquement selon l'axe (Oz).



1.3.1.1. Le faisceau de longueur $L = 500 \mu\text{m}$ balaie la pièce avec la vitesse

$v = 12,5 \text{ mm.s}^{-1}$. Calculer la durée τ pendant laquelle un point M est chauffé.

1.3.1.2. On prend $J_{\text{Laser}} = 4,0 \cdot 10^4 \text{ W.cm}^{-2}$.

Le rayonnement est réfléchi à 82%.

Calculer J_0 la densité de puissance absorbée par l'acier.

1.3.1.3. L'énergie lumineuse absorbée sous forme de rayonnement en $z = 0$ va se propager à l'intérieur du métal. Quel est le mode de transfert thermique mis en jeu ?

1.4. On considère maintenant que $J_0 = 7,2 \cdot 10^7 \text{ W.m}^{-2}$. Ce mode de transfert thermique peut être modélisé par la relation (1) :

$$\theta(z,t) = \theta_0 + \frac{2J_0}{K} \overline{D \cdot t} \times F(u) \quad \text{avec} \quad u = \frac{z}{2 \sqrt{D \cdot t}}$$

$F(u)$ est une fonction dont le graphe est donné en **annexe 1**.

K est une constante.

D est la diffusivité thermique

Données :

$K = 35 \text{ W.}^{\circ}\text{C}^{-1}.\text{m}^{-1}$, $D = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$, $\tau = 40 \text{ ms}$,

Température d'austénitisation $\theta_a = 880 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

1.4.1. Quelle est la dimension de la variable u ? Justifier.

1.4.2. La pièce est initialement à la température $\theta_0 = 20^{\circ}\text{C}$. Montrer que, dans ce cas,
 $\theta(z,\tau) = \theta_0 + 2,6 \cdot 10^3 \times F(u)$

1.4.3. La température d'austénitisation θ_a est atteinte à la date $t = \tau$.
 Calculer $F(u)$ à partir de la relation (1).

1.4.4. Déterminer graphiquement u (**annexe 1 à rendre avec la copie**).

En déduire la profondeur z .

1.4.5. La profondeur z calculée est une estimation de la profondeur traitée.

La profondeur réelle traitée sera inférieure à cette valeur. Pourquoi ?

1.5. Phase de refroidissement (**toutes les données de la partie 1.4. restent valables**).

La phase de refroidissement doit être très rapide : elle se fait dans la masse de la pièce par conduction.

On désire vérifier que le refroidissement par les deux autres modes de transfert thermique est négligeable.

On rappelle que la densité de flux absorbée par la pièce lors du chauffage est $J_0 = 7,2 \cdot 10^7 \text{ W.m}^{-2}$.

1.5.1. Refroidissement par rayonnement

La densité de flux rayonnée par unité de surface portée à la température $T(\text{K})$ est donnée par la loi de Stefan $J_{ray} = \sigma \times T^4$ pour un corps noir avec $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \text{ W.m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ On rappelle que $T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273$.

1.5.1.1. En supposant que le métal rayonne comme un corps noir lorsque la température de la pièce est proche de la température de fusion $\theta_S = 1527^{\circ}\text{C}$, calculer J_{ray} .

1.5.1.2. Comparer J_{ray} à la valeur de J_0 et conclure.

1.5.2. Refroidissement par convection

La densité de flux échangée par convection dans l'air est donnée par la relation de Newton $J_{conv} = h \times (\theta_S - \theta_0)$ où $h = 15 \text{ W.m}^{-2} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ pour une plaque portée à la température θ_S refroidissant dans l'air à la température $\theta_0 = 20^{\circ}\text{C}$.

1.5.2.1. Calculer J_{conv} en prenant $\theta_S = 1527^{\circ}\text{C}$.

1.5.2.2. Comparer J_{conv} à la valeur de J_0 et conclure.

1.6. La régulation de température de la trempe LASER

Une régulation de la puissance du chauffage LASER par mesure pyrométrique de la température peut être utilisée.

On désire que la pièce traitée ne soit pas chauffée à une température supérieure à 1500°C en surface.

1.6.1. La longueur d'onde pour laquelle le rayonnement thermique du corps noir est le plus intense est donnée par la loi de Wien $\lambda_{max} \mu m = \frac{2898}{T}$ pour une source à la température T(K).

Calculer λ_{max} en μm .

1.6.2. Quel pyromètre choisiriez-vous ? (**document 3**)

Exercice 2 – Contrôle d'une atmosphère de traitement thermique – 6,5 points

Pour des usages très intenses la bielle sécable est forgée dans l'acier de désignation 35NiCrMo16.

Après forgeage, elle subit un cycle de traitements thermiques avant la trempe LASER. Ce traitement a pour objectif d'améliorer ses qualités mécaniques internes.

Cet acier est austénitisé à la température de **875°C**. On souhaite maintenir un **potentiel carbone d'environ 0,4%**.

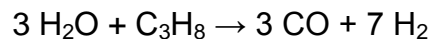
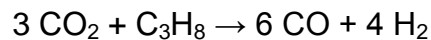
Document 4 : Procédé Variocarb®

« Le Variocarb-direct* est un procédé qui permet, à moindre coût, une trempe et un revenu d'aciers sans décarburation.

Au lieu d'utiliser du gaz endothermique fabriqué dans des générateurs spéciaux ou à partir d'azote et de méthanol liquide, le traitement thermique est réalisé sous azote.

Le Variocarb-direct* permet d'apporter directement dans le four un mélange contrôlé azote/hydrocarbure (propane) empêchant de manière efficace la décarburation de l'acier.

Le dioxyde de carbone et l'eau réagissent avec le propane selon les équations suivantes :



... Le procédé est piloté par une sonde à oxygène...»

*D'après Messer; Gases for life
www.messer.fr*

...

- 2.1. Définir le potentiel carbone de l'atmosphère du four.
- 2.2. Pourquoi les teneurs en dioxyde de carbone et en eau doivent-elles être très faibles ?
- 2.3. Quel est le rôle du propane ?
- 2.4. Lors de l'installation, le fabricant mesure les pressions partielles de monoxyde de carbone CO et de dioxyde de carbone CO₂ par absorption infrarouge. Le potentiel carbone cible correspond à une activité du carbone en insertion **a_c = 0,3**.

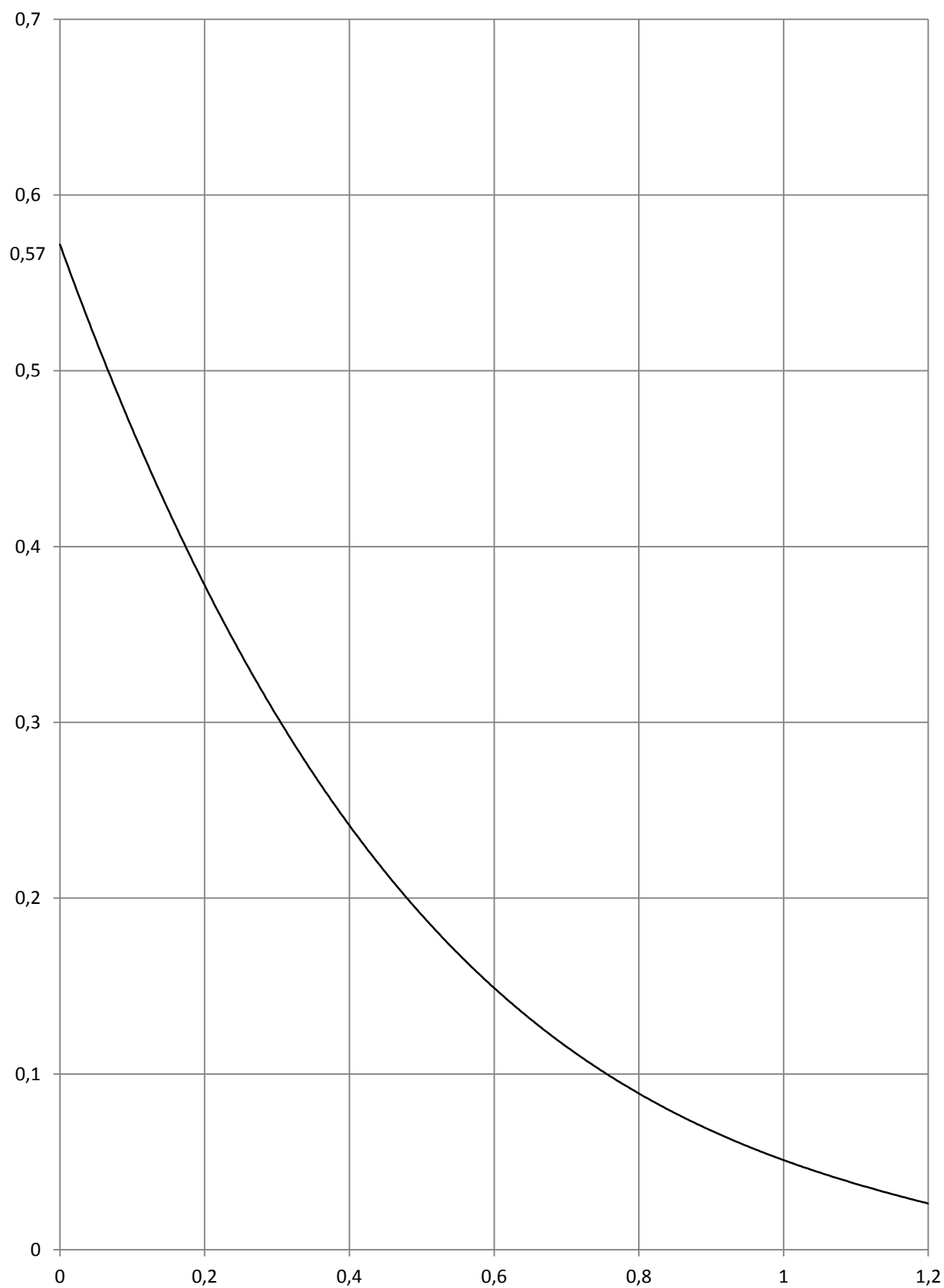
L'équilibre considéré est **2 CO ⇌ CO₂ + C_γ** de constante K.

à 298K	C _γ	CO	CO ₂
S° (J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)	5,7	197,6	213,6

- 2.4.1. Calculer la valeur de $\Delta_r S^\circ$.
- 2.4.2. On donne $\Delta_r H^\circ = -170,5 \text{ kJ/mol}$. En déduire la valeur de $\Delta_r G^\circ$ pour la température de traitement ($T = 1148 \text{ K}$).
- 2.4.3. Montrer que $K = 0,037$ à la température de traitement.
On prendra $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$
- 2.4.4. Exprimer K en fonction de P_{CO_2}, P_{CO}, a_C .
- 2.4.5. En déduire $\frac{P_{CO}^2}{P_{CO_2}}$.
Les pressions sont données en bar et on rappelle que $a_C = 0,3$.
- 2.4.6. Cette valeur est-elle en accord avec celle déterminée graphiquement sur **l'annexe 2 (à rendre avec la copie)** à la température de 875°C .

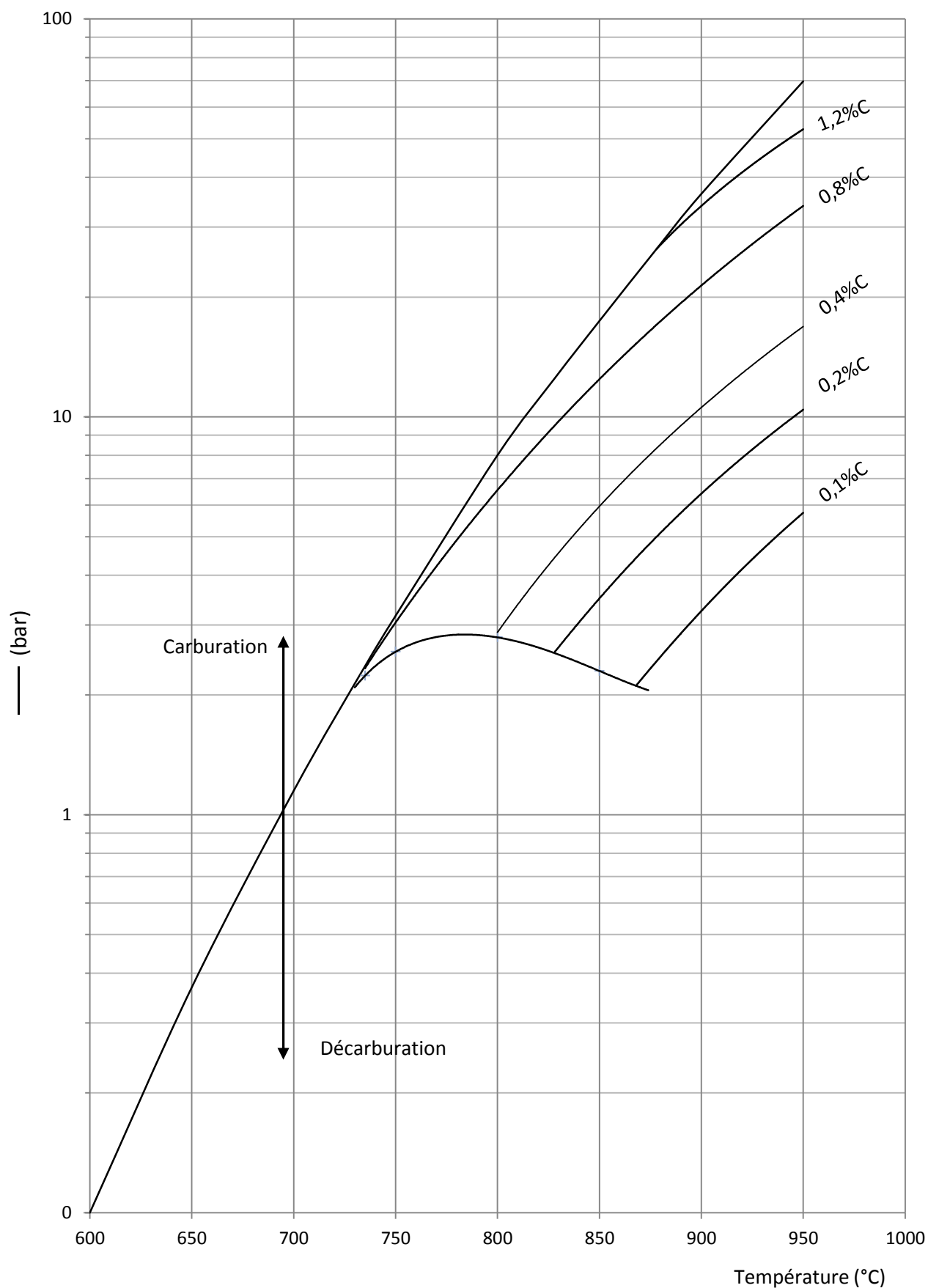
Annexe 1

F(u)



A rendre avec la copie /

Annexe 2



A rendre avec la copie /