

BREVET DE TECHNICIEN SUPERIEUR
TRAITEMENTS DES MATERIAUX

SCIENCES PHYSIQUES APPLIQUEES

Sous-épreuve spécifique à chaque option

Option A : Traitements Thermiques

- U4.3A -

SESSION 2016

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 3page 12/12

Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Le sujet comporte 12 pages, numérotées de 1/12 à 12/12.

BTS TRAITEMENTS DES MATERIAUX Sciences Physiques Appliquées	Session 2016
Sous-épreuve spécifique à chaque option – U4.3 A	Code : TMPC A Page 1 sur 12

Ce sujet s'appuie sur un article paru dans la revue "Traitements & Matériaux" en avril 2015. Le rédacteur de l'article est un ingénieur d'une entreprise française fabricant des installations de traitements thermiques sous vide et de cémentation basse pression.

L'exercice 1 porte sur les principes de la Cémentation Basse Pression (CBP) et donne des éléments de comparaison avec la cémentation sous atmosphère.

L'exercice 2, même s'il est totalement indépendant, est dans la continuité de l'article puisqu'il s'intéresse au chauffage sous vide et à la trempe.

Il est conseillé au candidat de faire une première lecture assez rapide de l'article placé en **ANNEXE 1** puis d'y revenir plus précisément quand les questions notamment l'exigeront.

De très nombreuses questions sont indépendantes.

Exercice 1 – Cémentation basse pression – 14,5 points
--

Le directeur d'une entreprise de traitement thermique demande à son responsable technique de réfléchir à l'opportunité pour l'entreprise de passer d'une cémentation sous atmosphère (CO, H₂, N₂) à une cémentation sous basse pression.

Ce dernier, pour se tenir au courant des dernières évolutions, consulte l'article paru dans la revue « Traitements & Matériaux » (voir **ANNEXE 1**).

Données :

Données thermodynamiques (à 25°C):

	C ₂ H _{2(g)}	C _(s)	H _{2(g)}
$\Delta_f H^\circ$ (kJ.mol ⁻¹)	226,75	0	0

Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

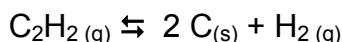
Nombre d'Avogadro : $N_a = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

1.1. Étude des phénomènes en jeu lors des réactions de craquage.

Remarque : Dans la nomenclature officielle, le nom de l'acétylène est l'éthyne. Mais dans l'industrie, c'est l'ancienne dénomination qui perdure.

1.1.a. Écrire la réaction de craquage du propane C_3H_8 en carbone monoatomique et en dihydrogène. Préciser les états physiques de ces espèces.

1.1.b. Dans le cas de l'acétylène, la réaction de craquage est :



Déterminer l'enthalpie standard de cette réaction à partir des données thermodynamiques fournies.

Conclure sur le caractère exothermique ou endothermique de cette réaction.

1.1.c. La cémentation est favorisée si la dissociation du gaz cémentant est favorisée.

La réaction précédente de craquage de l'acétylène peut-elle être favorisée par une diminution de la pression totale du système (*tout autre paramètre restant constant par ailleurs*) ? Justifier votre réponse, soit à l'aide la loi de le Chatelier (loi de modération), soit à partir de l'expression du quotient réactionnel.

Cette considération concernant la pression permet-elle de trancher en faveur d'un traitement de cémentation basse pression (CBP) plutôt qu'une cémentation gazeuse classique ?

1.1.d. Par ailleurs, la cémentation est favorisée si la dissociation de l'espèce réactive gazeuse (ici l'acétylène) a lieu au contact de la pièce et non ailleurs dans le four.

Il faut, pour cela, limiter les chocs entre les molécules gazeuses dans le four car ces chocs peuvent initier la réaction de craquage dans le four et non à la surface de la pièce.

Expliciter comment un abaissement de pression favorise la cémentation. *Vous pouvez étayer votre argumentation en vous basant sur les éléments de « théorie cinétique des gaz » donnés en ANNEXE 2.*

1.2. Compréhension du cycle thermique.

On s'intéresse au procédé INFRACARB en lui-même, décrit dans l'article (des lignes 20 à 30 en particulier).

On choisit de l'appliquer à un échantillon d'acier 20MnCr5 (comportant 0,2% en masse de carbone) que l'on souhaite cémenter à 980°C, de sorte que sa surface à la fin du traitement ait la composition de l'eutectoïde.

1.2.a. En admettant que le diagramme métastable fer-cémentite donné en **ANNEXE 3** s'applique à l'acier considéré, indiquer quelle est la limite de solubilité du carbone dans l'austénite à 980°C (*cette valeur sera déterminée par un tracé précis qui figurera sur l'ANNEXE 3 à rendre avec la copie*).

1.2.b. La **figure 6** de l'article fait apparaître 3 taux particuliers de carbone : « initial %C », « final %C » et « %C maximum ».

Dans le cas du traitement choisi, ici à 980°C, et selon les lectures faites sur la figure 6, quelles sont les valeurs pour « initial %C » et « final %C » ?

Quelle est la valeur maximale pour « %C maximum » ?

1.2.c. Un cycle de cémentation est constitué d'une phase appelée « Carb. Boost » (*zone grisée sur la figure 6*) suivie d'une phase appelée « Diff. » (*zone blanche sur la figure 6*).

Au cours de chaque phase, que devient le carbone apporté par la dissociation du gaz réactif ?

D'où vient la nécessité d'alterner ces phases lors du traitement ?

1.3. Influence de la température sur la vitesse de diffusion.

La durée du traitement de cémentation est liée au coefficient de diffusion D du carbone dans l'austénite.

Ce coefficient de diffusion D varie avec la **température absolue T** ($T(K) = \theta(^{\circ}C) + 273$) suivant une loi de type Arrhénius :

$$D = D_0 \times e^{\frac{-\Delta_D H}{R \cdot T}}$$

Avec $D_0 \approx 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et $\Delta_D H = 134 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

1.3.a. Vérifier que le coefficient de diffusion du carbone dans l'austénite à 980°C $D_{980^{\circ}C}$ est égal à $2,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

1.3.b. Considérons le temps de cémentation t pour obtenir une profondeur conventionnelle de 1,2 mm. Le **tableau 1** présenté dans l'article indique notamment cette valeur à 980°C ($t_{980^{\circ}C}$) pour un acier 20MnCr5.

Le temps de cémentation est sensiblement inversement proportionnel au coefficient de diffusion, autrement dit le produit ($D_T \times t_T$) est constant, T étant la température de cémentation.

Le coefficient de diffusion à 1050°C est $D_{1050^\circ\text{C}} = 5,1 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Calculer la durée de traitement $t_{1050^\circ\text{C}}$ à 1050°C pour obtenir une profondeur de cémentation conventionnelle de 1,2 mm.

Comparer $t_{980^\circ\text{C}}$ et $t_{1050^\circ\text{C}}$. Est-ce conforme aux affirmations de l'auteur de l'article ? Préciser clairement le passage correspondant dans l'article.

1.4. Éléments de comparaison entre la cémentation BP et la cémentation sous atmosphère.

1.4.a. A la fin de l'article (à partir de la ligne 86), l'auteur évoque les avantages de la CBP par rapport à la cémentation sous atmosphère. Citer 3 avantages au niveau environnemental.

1.4.b. Ligne 33, l'auteur écrit : « la cémentation traditionnelle basée sur l'équilibre CO/CO₂ ». Écrire l'équilibre correspondant.

1.4.c. Aux lignes 107 et 108, l'auteur affirme que le traitement CBP s'effectue en l'absence d'oxydation de la pièce traitée, contrairement à la cémentation gazeuse traditionnelle sous atmosphère.

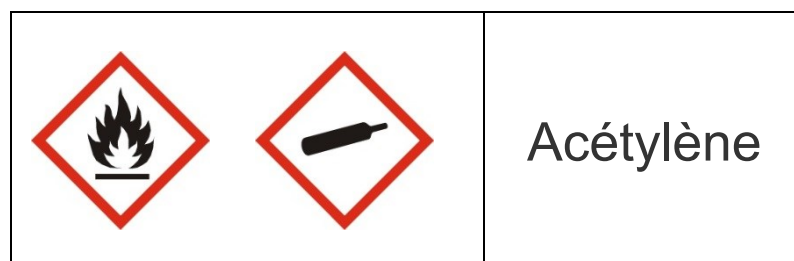
Quels sont les deux gaz présents lors d'une cémentation gazeuse traditionnelle responsables de cette oxydation ?

1.4.d. Ligne 77, l'auteur évoque certaines précautions à prendre en cas d'utilisation de monoxyde de carbone CO.

Citer un des dangers liés à l'utilisation du CO.

Quelle est la précaution à prendre au niveau de l'installation avant les rejets des fumées dans l'atmosphère ?

1.4.e. La fiche signalétique de l'acétylène indique deux pictogrammes présentés ci-dessous :



Quels sont les dangers liés à l'utilisation de l'acétylène ?

Exercice 2 – Chauffage et trempe dans un four sous vide – 5,5 points
--

Données / Rappels :

- **Quantité d'énergie Q mise en jeu lors d'un changement de température :**

$$Q = m c (T_{final} - T_{initial})$$

Avec : $T_{initial}$ et T_{final} les températures initiale et finale du système

m la masse du système considéré

c la capacité thermique massique. Dans le cas de l'acier, la valeur moyenne entre 20 et 1000°C est $c = 470 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

On considère le traitement de cémentation sous basse pression de 1 tonne d'acier.

Pour cela, l'acier doit être chauffé de la température ambiante (20°C) à la température de traitement (980°C). Ce chauffage est réalisé grâce à 6 résistances chauffantes.

A la fin du traitement on réalise une trempe gaz.

2.1. Chauffage.

Au cours d'une première étape, de 20°C à 800°C, le transfert thermique se fait par convection sous atmosphère de diazote (1 bar).

A 800°C, on réalise le vide jusqu'à une pression de 1 mbar. A partir de cette température (800°C), le transfert thermique se fait par rayonnement.

2.1.a. Pourquoi est-il nécessaire de commencer la montée en température par un transfert thermique par convection et non directement par rayonnement ?

2.1.b. Déterminer la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer une tonne d'acier de la température ambiante (20°C) jusqu'à la température de traitement (980°C).

En réalité, la quantité d'énergie électrique à fournir au four de traitement est plus importante que la valeur trouvée précédemment. Pourquoi ?

2.2. Maintien en température

Pour maintenir une tonne d'acier à la température de traitement de 980°C, la puissance nécessaire est de 35 kW (d'après l'article en **ANNEXE 1**, ligne 90).

Le chauffage est assuré grâce à six résistors en graphite fonctionnant sous une tension de 220 V. Chaque résistor est constitué d'une barre en graphite de surface rayonnante $S = 396 \text{ cm}^2$.

Le transfert thermique se fait alors par rayonnement.

2.2.a Sachant qu'il y a six barres en graphite dans le four, quelle est la puissance dissipée par chaque barre ?

2.2.b Vérifier que l'émittance énergétique M est égale à 147 kW.m^{-2} pour une barre. On considérera que l'énergie dissipée par effet Joule dans les barres est intégralement convertie en énergie rayonnante.

2.3. Trempe.

Les installations de traitements thermiques sous vide ou de cémentation basse pression comportent des cellules de trempe huile ou de trempe gaz.

La trempe gaz peut être réalisée soit avec de l'hélium ou de l'azote, les pressions pouvant aller jusqu'à 20 bar.

Le tableau ci-dessous présente deux caractéristiques de ces gaz à 25°C à une pression de 1,013 bar :

Nature du gaz	He	N ₂
Capacité thermique molaire ($\text{J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	20,8	29,0
Conductivité thermique ($\text{mW.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	152	26

2.3.a. D'après le tableau ci-dessus, quel est le gaz qui a le meilleur pouvoir de refroidissement (à la pression donnée) ? Justifier votre réponse.

2.3.b. Pour des caractéristiques de drasticité identiques, quel est l'avantage d'une trempe gaz par rapport à une trempe huile ?

ANNEXE 1 :
Extrait de la revue « TRAITEMENTS & MATERIAUX » n°433
Mars-Avril 2015

Installations de traitement thermique sous vide modulaires et flexibles

Pierre Bertoni, ingénieur, ECM Technologies

Respectueux de l'environnement, le traitement thermique sous vide ainsi que la cémentation basse pression ont été largement diffusés ces dernières décennies. [...] Ces technologies offrent de nombreuses possibilités permettant de répondre aux nouvelles exigences en terme de productivité et de qualité notamment de l'industrie automobile et aéronautique.

Principes de la cémentation basse pression

[...] Développer de nouvelles machines et de nouvelles applications pour la Cémentation Basse Pression demande de comprendre les bases de ce procédé. Le processus de CBP *INFRACARB*, breveté par ECM Technologies, est un traitement thermique utilisant des gaz de cémentation et des gaz neutres de manière alternée. Ce processus offre également une bonne homogénéité des profondeurs de cémentation grâce à un contrôle précis lors de l'élaboration de la recette et un enrichissement simultané de toutes les pièces dans la charge.

- 10 Principales caractéristiques de la CBP :
- Injection et craquage d'un hydrocarbure gazeux (C_2H_2 , C_3H_8 , C_2H_4) sous basse pression (7-13 mbar) dans un four sous vide à parois froides.
 - Alternance de phases de cémentation (injection d'hydrocarbure gazeux) et de phases de diffusion (injection de gaz neutre). Voir figure 6.
- 15 - Le nombre d'alternance et la durée de ces phases sont déterminés par la profondeur efficace de cémentation et le taux de carbone en surface souhaités. [...]



Fig. 3 : Charge de couronnes pour four de CBP

Le procédé INFRACARB

- 20 Le procédé Infracarb consiste en une injection en alternance d'hydrocarbure (C_2H_2 ou C_3H_8), pour créer un enrichissement en surface par craquage des molécules à haute température et d'un gaz neutre N_2 pour la diffusion.
- 25 L'objectif est de maintenir la concentration en carbone monoatomique issue de la dissociation du gaz réactif sur la surface des
- 30 pièces à un niveau élevé sans atteindre la limite de solubilité du carbone dans l'acier donc sans formation de suie. Ainsi le rendement de la réaction est bien supérieur à l'atmosphère de cémentation traditionnelle basée sur l'équilibre CO/CO_2 , tout en étant moins sujet aux variations d'atmosphère. [...]
- 35 Le procédé Infracarb d'ECM Technologies garantit un contrôle précis des paramètres physiques simples : température, durée des

40 phases d'injection de gaz, débits, pressions, pour des résultats optimaux. La température du process est généralement plus élevée qu'en cémentation classique, entre 880 et 1 050°C, car la technologie des zones de chauffe en

45 graphite des fours sous vide le permet. Le temps de cycle est réduit significativement, jusqu'à 50 % selon la profondeur de cémentation.

		Temps de cémentation et diffusion pour différentes températures		
Acier	Profondeur conventionnelle de cémentation (mm)	940 °C	960 °C	980 °C
20MnCr5	0,9	195 min	135 min	100 min
	1,2	360 min	270 min	210 min

Tableau 1 : Temps approximatif de cémentation et diffusion d'un acier 20MnCr5 pour différentes profondeurs et différentes températures

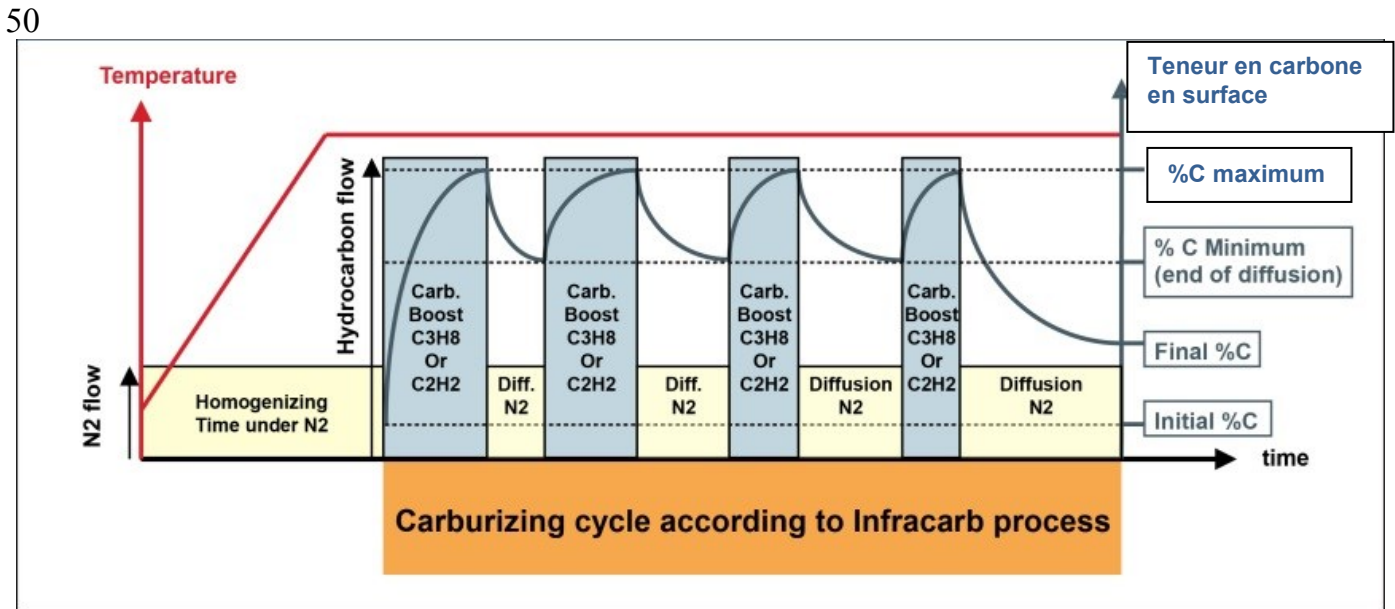


Fig. 6 : Process Infracarb

Lexique Anglais/Français : Flow : flux

Carburizing cycle : cycle de cémentation

55 **Avantages de la CBP + trempe gaz haute température**

60 Le four de CBP utilise une technologie de parois froides afin que la surface extérieure du four reste à faible température, réduisant ainsi la quantité de chaleur émise dans l'usine. [...] Grâce à la technologie des parois froides, les dangers spécifiques à la technologie des parois chaudes, tels que les flammes et les surfaces chaudes, sont également supprimés. De plus, des hottes de

ventilation ne sont pas nécessaires pour se débarrasser des gaz brûlés. [...]

70 Les points de sécurité concernant l'utilisation de l'acétylène sont aussi plus faciles à traiter. Les fournisseurs d'acétylène ont maintenant des solutions avec des systèmes anti-explosion fiables et des systèmes de prévention d'incendies. Puisque le gaz endothermique (CO, H₂, N₂) n'est pas nécessaire, il n'y a pas de précautions à prendre concernant le monoxyde de carbone.

L'avantage le plus important d'un four de CBP est la réduction du temps de cycle en utilisant des températures de cémentations plus élevées. Certaines pièces de production sont maintenant cémentées jusqu'à 1 050° C, réduisant ainsi le temps de cémentation d'environ 75%. De nouveaux essais atteignent même des températures encore plus élevées. [...]

Efficacité et économies d'énergie sont d'autres avantages d'un four de CBP. La technologie du vide est la plus efficace avec seulement 35 KW nécessaires pour maintenir une tonne d'acier à température. L'utilisation de gaz est considérablement réduite puisqu'il est utilisé le plus efficacement possible (par exemple, pour une charge de 500kg le temps d'injection total d'acétylène pour obtenir une profondeur de 0,3 mm est d'environ 7 minutes).

[...]

100 Pour conclure, des différences significatives entre un four conventionnel classique et un four de CBP peuvent être constatées. La Cémentation Basse Pression (CBP), effectuée dans des fours sous vide à parois froides, offre de nombreux avantages par rapport à la cémentation sous atmosphère traditionnelle : absence d'oxydation, meilleure homogénéité de cémentation, excellente reproductibilité du traitement de charge à charge, resserrement des tolérances métallurgiques comme la profondeur de cémentation et au final, maîtrise des duretés à cœur des pièces. Grâce à une diminution importante des rejets de CO₂ et d'espèces chimiques nocives, ce procédé est favorable aux normes environnementales.

ANNEXE 2 : Eléments de « théorie cinétique des gaz »

Le libre parcours moyen $\bar{\ell}$ d'une particule, telle qu'une molécule gazeuse, est la distance moyenne parcourue entre deux collisions successives avec d'autres particules en mouvement.

Il s'évalue à partir de la relation :

$$\bar{\ell} = \frac{k \times T}{\sqrt{2} \times \sigma \times p}$$

où k est la constante de Boltzmann : $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$

T est la température absolue (en K)

σ est la section efficace de collision (qui est liée à la taille de la molécule).

p la pression (en Pa)

ANNEXE 3 : Diagramme Fe-Fe₃C

A rendre avec la copie

