

# **BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR**

## **TRAITEMENTS DES MATÉRIAUX**

**SCIENCES PHYSIQUES APPLIQUÉES**

Sous-épreuve spécifique à chaque option

Option A : Traitements Thermiques

- U4.3A -

SESSION 2025

DURÉE : 2 HEURES

COEFFICIENT : 2

**Matériel autorisé :**

- L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.
- L'usage de la calculatrice sans mémoire, « type collègue », est autorisé.

Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il soit complet.  
Le sujet comporte 10 pages, numérotées de 1/10 à 10/10.

La cémentation sous atmosphère est le traitement thermochimique superficiel le plus utilisé pour améliorer les propriétés mécaniques des aciers. Le carbone apporté en surface par l'atmosphère de cémentation diffuse ensuite en profondeur dans l'acier.

L'exercice 1 porte sur le contrôle d'une atmosphère de cémentation à l'aide d'une sonde à absorption infrarouge CO/CO<sub>2</sub>.

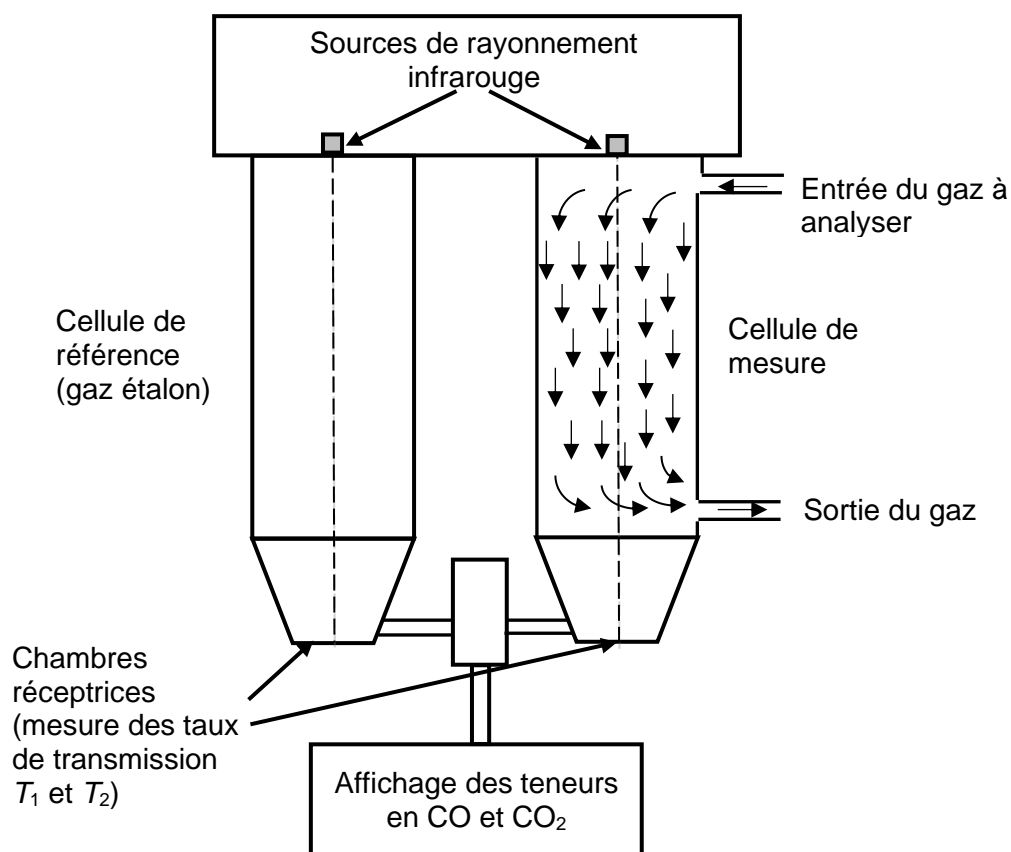
L'exercice 2 s'intéresse à la diffusion du carbone dans l'acier et en particulier à un procédé permettant de réduire la durée du traitement.

### Exercice 1 : Contrôle du potentiel carbone avec une sonde à absorption infrarouge – 10,5 points

Un technicien supérieur dans un atelier de traitements thermiques veut contrôler une atmosphère de cémentation traditionnelle. Pour cela, il dispose d'un analyseur à infrarouge (IR) qui permet de mesurer les teneurs en CO, CO<sub>2</sub> ou CH<sub>4</sub> de l'atmosphère.

#### Partie A : Compréhension du principe de la sonde à absorption IR

Ce type de sonde compare l'absorption d'un rayonnement infrarouge dans une cellule de référence contenant un étalon de gaz avec celle d'une cellule de mesure où circule l'atmosphère à analyser (Figure 1).



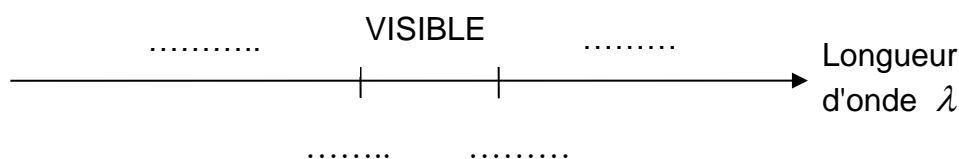
**Figure 1 : Schéma de principe de l'analyseur infra-rouge**

Tous les gaz, à l'exception des atomes isolés et des *molécules diatomiques symétriques* absorbent certaines fréquences dans le domaine IR.

1. Donner deux exemples de *molécules diatomiques symétriques* que l'on trouve de **manière significative** dans le gaz porteur d'une atmosphère de cémentation gazeuse (obtenue par craquage du méthanol ou par combustion ménagée d'un hydrocarbure gazeux) et qui ne seront pas détectées par ce type de détecteur.
2. La fréquence absorbée par une molécule de monoxyde de carbone CO est égale à  $6,7 \times 10^{13}$  Hz. Calculer la valeur de la longueur d'onde  $\lambda$  correspondante à cette fréquence.

On prendra pour valeur de la célérité de la lumière dans le vide  $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

3. Sur l'axe ci-dessous (**à reproduire sur votre copie**), préciser les valeurs limites des longueurs d'onde du spectre du visible puis compléter le nom des domaines frontières. Vérifier à l'aide de ce schéma que la longueur d'onde  $\lambda$  déterminée à la question 2 appartient au domaine de l'infra-rouge.



#### Rappels :

- L'absorption du rayonnement par le mélange gazeux est régie par une loi de type Beer-Lambert : l'absorbance  $A$  est proportionnelle à la teneur  $X$  en gaz (pour une cellule de dimension donnée et une longueur d'onde donnée).
- L'absorbance  $A$  est définie par  $A = -\text{Log}(T)$  où  $T$  est le taux de transmission.

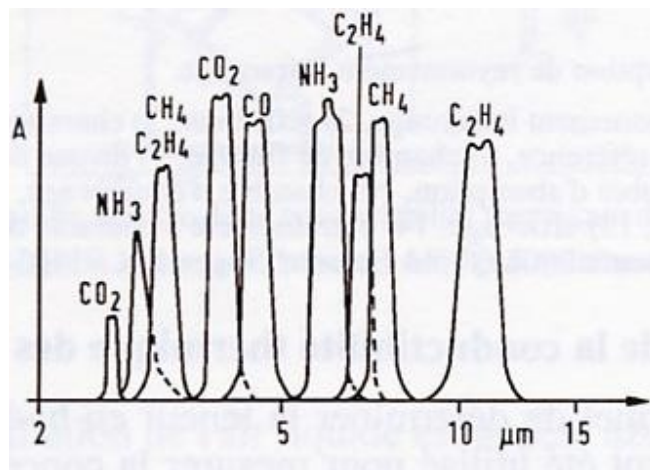
Pour la cellule de comparaison, contenant un gaz étalon de teneur  $X_1 = 18,4 \%$  en CO, le taux de transmission  $T_1$  pour une longueur d'onde de  $4,5 \mu\text{m}$  est de 0,382. Pour l'atmosphère de cémentation étudiée (circulant dans la cellule de mesure, voir Figure 1), le taux de transmission  $T_2$  à cette même longueur d'onde est 0,361.

4. Déterminer la valeur de l'absorbance  $A_1$  du gaz étalon correspondant à un taux de transmission  $T_1$  de 0,382.
5. Déterminer de même la valeur de l'absorbance  $A_2$  de l'atmosphère de cémentation.
6. Compte tenu de la proportionnalité entre l'absorbance  $A$  et la teneur  $X$ , déterminer la valeur de la teneur  $X_2$  en CO dans l'atmosphère de cémentation étudiée.

Une sonde à absorption infrarouge peut mesurer à la fois la teneur en CO et CO<sub>2</sub>.

7. Compte tenu du diagramme ci-dessous (Figure 2), proposer les deux valeurs de longueurs d'onde permettant de mesurer la teneur en CO<sub>2</sub>.

*On proposera des valeurs approximatives dans la mesure où l'échelle de l'axe des abscisses n'est pas linéaire.*

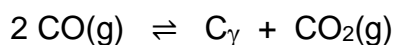


**Figure 2 :** Bandes d'absorption de quelques gaz dans le domaine IR

Source : Introduction à la technique des atmosphères contrôlées - Claude BEGUIN - Association suisse de traitement thermique.

### **Partie B : Application à la mesure du potentiel carbone**

L'exploitation de la mesure des teneurs en CO et CO<sub>2</sub> repose sur l'équilibre :



8. Exprimer la constante d'équilibre  $K$  en fonction de l'activité en carbone et des pressions partielles des différents gaz en présence.
9. Vérifier que la variation d'enthalpie libre standard de la réaction est donné par :

$$\Delta_r G^\circ(T) = -172\,300 + 175,8 \cdot T \text{ (J} \cdot \text{mol}^{-1}\text{)}$$

On rappelle la valeur de la constante des gaz parfaits  $R = 8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

Extrait de la table thermodynamique (à 25 °C) :

Corps	C(s)	CO(g)	CO <sub>2</sub> (g)
$\Delta_f H^\circ \text{ (kJ} \cdot \text{mol}^{-1}\text{)}$	0	-110,6	-393,5
$S^\circ \text{ (J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}\text{)}$	5,7	197,6	213,7

On considérera que les variations d'enthalpie et d'entropie standard de réaction sont indépendantes de la température (approximation d'Ellingham).

10. En déduire la valeur de la constante d'équilibre  $K$  à 890 °C.

Un analyseur IR indique des teneurs respectives en CO de 19,8 % et en CO<sub>2</sub> de 0,21 %.

11. Déterminer la valeur de l'activité  $a_C$  du carbone dans l'austénite sous une pression totale de 1 bar et à une température de 890 °C.

12. En déduire la valeur du potentiel carbone  $PC$  de l'atmosphère à 890 °C.

On rappelle la relation d'Ellis : 
$$a_C = \frac{1,07 \cdot PC \cdot e^{\frac{4798,6}{T}}}{100 - 19,6 \cdot PC}$$

$T$  : température absolue

$PC$  : potentiel carbone

13. Citer une autre méthode de contrôle d'une atmosphère de cémentation souvent utilisée en milieu industriel. Expliquer succinctement son principe.

### Exercice 2 : Diffusion du carbone dans un acier – 9,5 points

On s'intéresse dans cet exercice à la cémentation sous atmosphère (CO, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) de grands engrenages pour l'industrie de l'énergie de nuance 18CrNiMo7-6. On vise une dureté superficielle de  $(60 \pm 2)$  HRC avec une valeur de la profondeur conventionnelle de cémentation très élevée (supérieure à 2,5 mm voire même de 3,5 mm).

Cela implique des traitements extrêmement longs. Le plus souvent, après la phase de préchauffe, on réalise un processus de cémentation en deux phases appelé couramment boost-diffuse, où un potentiel en carbone plus élevé est utilisé au début du processus (phase de boost) puis un potentiel en carbone plus faible dans la seconde moitié du processus (phase de diffusion) (Figure 3).

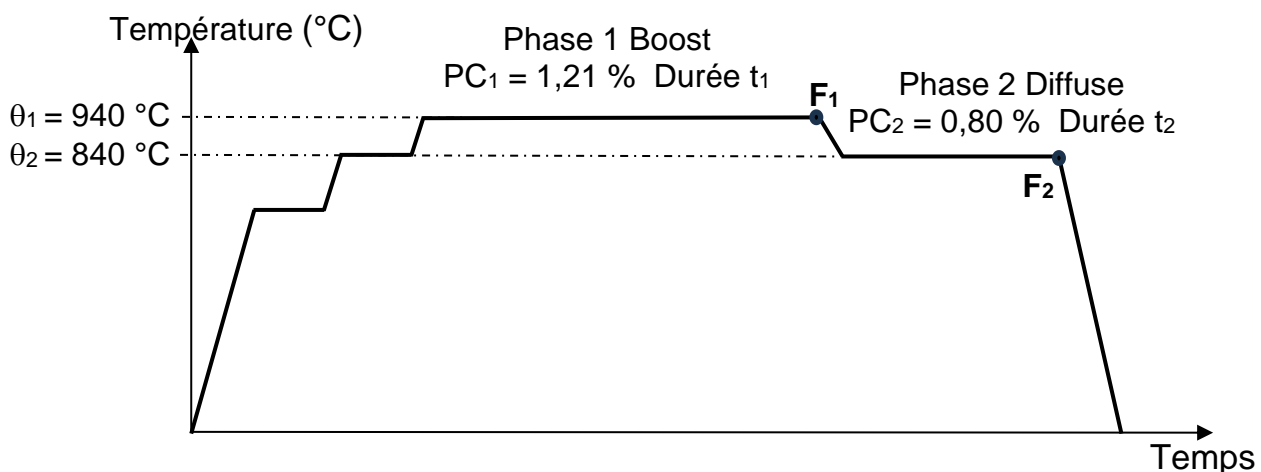
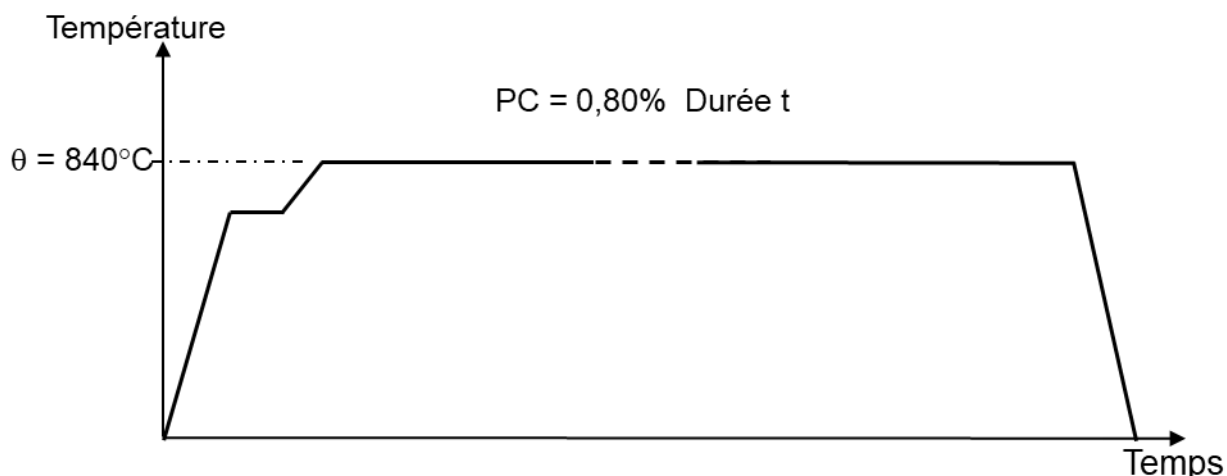


Figure 3 : Exemple de cycle de cémentation à deux phases

Ce procédé de cémentation en deux phases permet de réduire le temps total nécessaire pour atteindre une profondeur de cémentation donnée, par rapport à la cémentation en une seule phase, où le potentiel en carbone est maintenu constant à la valeur visée (typiquement 0,80 %) tout au long du processus (voir Figure 4).



**Figure 4 :** Exemple de cycle de cémentation en une phase

L'objectif de cet exercice est d'identifier les paramètres à l'origine de cette réduction du temps de traitement.

### **Partie A : La première loi de Fick**

Dans l'**annexe page 10/10** est rappelée l'expression de la première loi de Fick.

1. Nommer la grandeur  $\partial C / \partial x$  qui intervient dans la première loi de Fick. Préciser son unité.

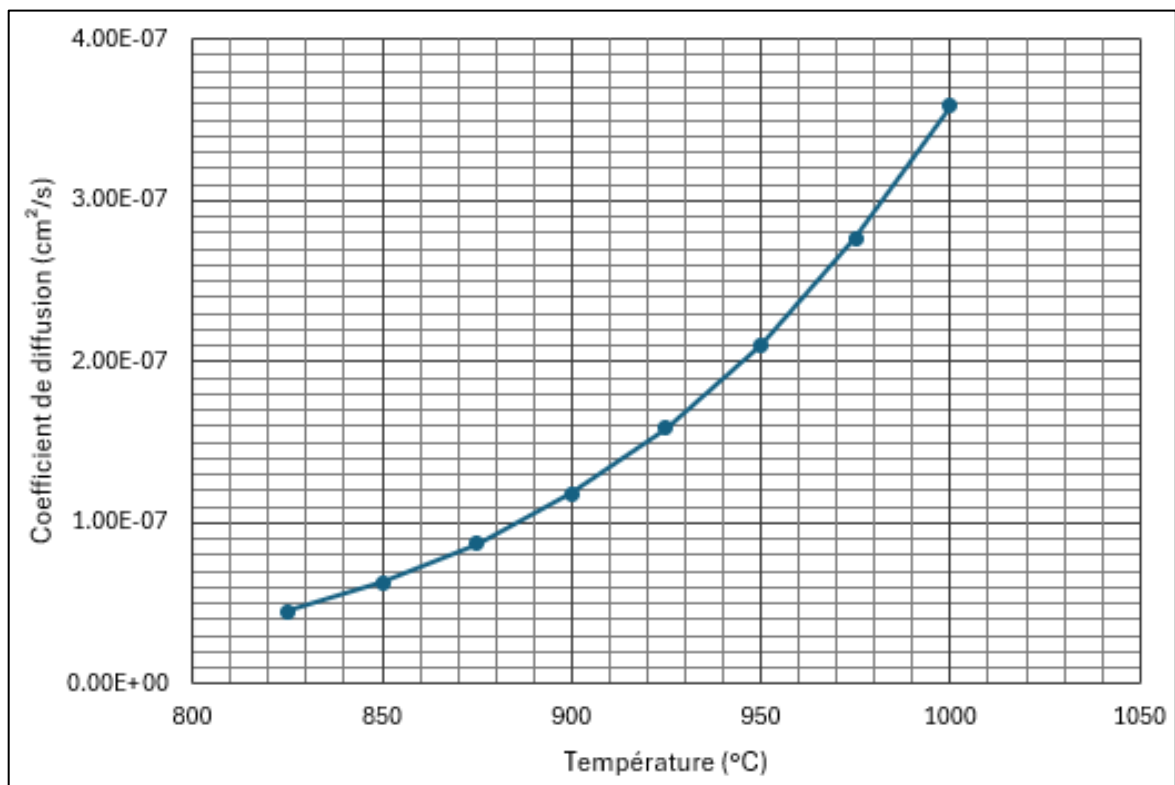
Le coefficient de diffusion  $D$  du carbone dans l'austénite dépend assez fortement de la température selon la relation :

$$D(T) = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H_D}{R \cdot T}\right)$$

où  $D_0 = 0,162 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ;  
 $\Delta H_D$  est la variation d'enthalpie de diffusion du carbone dans l'austénite  $\Delta H_D = 137,8 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$  ;  
 $R$  est la constante des gaz parfaits ( $8,314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) ;  
 $T$  est la température absolue (Kelvin).

2. Calculer la valeur du coefficient de diffusion  $D(840^\circ \text{C})$  pour une température de  $840^\circ \text{C}$  en utilisant la relation précédente.
3. Sur la Figure 5 en page 7/10, relever la valeur du coefficient de diffusion  $D(940^\circ \text{C})$  à la température de  $940^\circ \text{C}$  puis la comparer à la valeur précédente.
4. En s'appuyant sur la loi de Fick rappelée en **annexe page 10/10**, comparer la densité de flux de carbone de la première phase d'un traitement de cémentation en

deux phases (Figure 3) à la densité de flux qu'on aurait avec un traitement en une phase unique à 840 °C (Figure 4).



**Figure 5 :** Évolution du coefficient de diffusion du carbone dans l'acier en fonction de la température.

### **Partie B : Masse diffusée pendant un traitement de cémentation**

À partir de la première et seconde loi de Fick, on peut montrer que la masse  $m$  de carbone qui diffuse dans une pièce de surface  $S$  pendant une durée  $t$  est donnée par la relation :

$$m = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \rho \cdot (w_s - w_0) \cdot S \cdot \sqrt{D \cdot t}$$

$\rho$  : masse volumique de l'acier : 7,85 g·cm<sup>-3</sup> ;

$w_0$  : fraction massique en carbone à cœur ;

$w_s$  : fraction massique en carbone en surface ;

$D$  : coefficient de diffusion à la température de traitement considérée.

5. Compte-tenu de la nuance d'acier considérée dans cet exercice, justifier que la valeur de la fraction massique  $w_0$  est  $1,8 \times 10^{-3}$ .
6. Donner la valeur de la fraction massique  $w_s$  lors de la phase de cémentation si le potentiel carbone vaut  $PC_1 = 1,21$  %. Expliquer brièvement. On négligera l'influence des éléments d'addition de l'acier.
7. Vérifier qu'à partir d'une surface  $S$  exprimée en cm<sup>2</sup> et un coefficient de diffusion  $D$  en cm<sup>2</sup>·s<sup>-1</sup>, la masse volumique de l'acier doit être exprimé en g·cm<sup>-3</sup> pour

déterminer une masse  $m$  en g à partir de la relation donnée au début de la partie B de cet exercice.

L'engrenage qui est cémenté a une surface totale de 8 000 cm<sup>2</sup>.

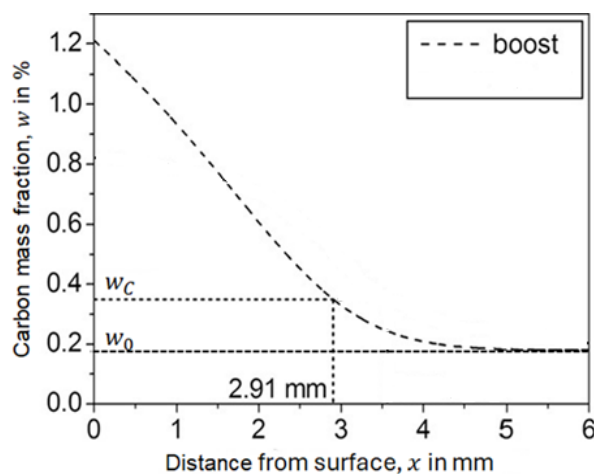
8. Calculer la valeur de la masse  $m$  qui a diffusé lors de la première phase à une température de 940 °C pendant une durée de 30 h. On prendra  $D(940\text{ °C}) = 1,88 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Un calcul similaire montre que si l'on cimente pendant 30 h à cette même température mais sous un potentiel carbone de 0,80 %, la masse qui aurait diffusé dans l'acier aurait été de 63 g.

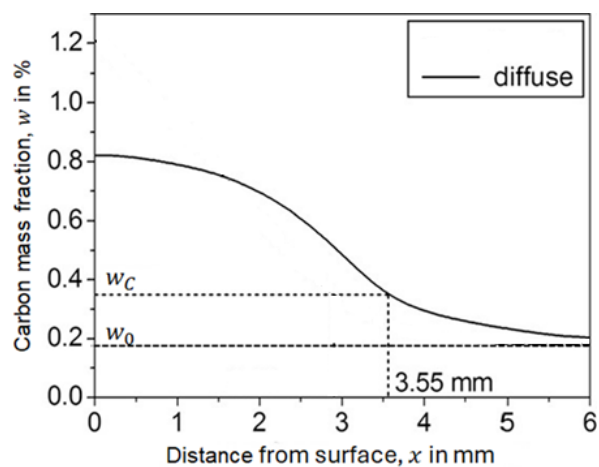
9. Conclure sur l'intérêt d'imposer un potentiel carbone de 1,21 % plutôt que 0,80 %.

### **Partie C : Profil carbone**

La Figure 6a ci-dessous montre le profil carbone après la première phase d'enrichissement fort en carbone (point F<sub>1</sub> de la Figure 3). La Figure 6b montre le profil carbone à l'issue de l'ensemble des deux phases (point F<sub>2</sub> de la Figure 3).



**Figure 6a**



**Figure 6b**

On rappelle que  $w_c$  est la fraction massique en carbone correspondant à la profondeur conventionnelle de cémentation.

10. Commenter et expliquer l'évolution du profil carbone entre la fin de la première phase (boost) et la fin de la seconde (boost + diffuse).

La durée totale pour obtenir la profondeur conventionnelle de cémentation de 3,55 mm (Figure 6b) à l'issue de la seconde phase dépasse les 40 h.



On veut ici calculer la durée qu'il aurait fallu pour atteindre cette profondeur de cémentation avec un traitement où le potentiel en carbone aurait été maintenu constant à 0,80 % tout au long du processus (procédé sans boost - Figure 4 en page 6) à la température de trempe ( $\theta = 840\text{ °C}$ ).

On rappelle que, dans le cas d'une cémentation sous un potentiel carbone fixe, l'évolution de la fraction massique  $w(x,t)$  en carbone en fonction de la profondeur  $x$  et de la durée  $t$  est donnée par la loi :

$$w(x,t) = w_s + (w_0 - w_s) \cdot \text{erf}(u)$$

où  $u$  est la variable de Cauchy :  $u = \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}}$  ;

$w_s$  : fraction massique en carbone en surface, ici  $w_s = 0,80\text{ %}$  ;

$w_0$  : fraction massique en carbone à cœur ;

$D$  : coefficient de diffusion. Ici  $D(840\text{ °C}) = 5,5 \times 10^{-8}\text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  ;

$t$  : durée de diffusion.

**11.** Sur la Figure 6a, relever la valeur de la fraction massique en carbone  $w_c$  correspondant à la profondeur conventionnelle de cémentation.

**12.** Calculer la valeur de  $\text{erf}(u)$  pour la fraction massique en carbone  $w_c$ .

Pour cette valeur de  $\text{erf}(u)$ , on trouve  $u = 0,775$ .

**13.** Déterminer la valeur de la durée  $t$  nécessaire pour obtenir une profondeur conventionnelle de cémentation égale à 3,55 mm. Montrer qu'elle dépasserait 10 jours.

Conclure sur le réalisme de mener un traitement de cémentation en une phase (voir Figure 4).

### **Partie D : Conclusion.**

**14.** Identifier les deux paramètres à l'origine de la réduction notable de la durée totale de traitement grâce au procédé Boost-Diffuse.

## Annexe

Extrait et traduit de A.J. Fuller, Jr., Introduction to carburizing and Carbonitriding, *Steel Heat Treating Fundamentals and Processes*. Vol 4A, *ASM Handbook*, ASM International, 2013, p 505-521

On rappelle que la première loi de Fick qui, dans le cas de la cémentation décrit le flux massique de carbone diffusant de la surface vers le cœur de la pièce, s'écrit :

$$J = -D \cdot \frac{\partial C}{\partial x}$$

où  $J$  est la densité de flux de particules (exprimé usuellement en  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) ;  
 $D$  est le coefficient de diffusion du carbone dans l'acier (en  $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) ;  
 $C$  est la concentration massique en carbone dans l'acier (en  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) ;  
 $x$  est la profondeur (en cm).

La durée du cycle de cémentation sera d'autant plus courte que la densité de flux sera importante.

Pour cela, on pourra chercher à augmenter la densité de flux de carbone en :

- augmentant la température pour augmenter le coefficient de diffusion ;
- augmentant la fraction massique en carbone en surface pour maximiser le gradient de carbone.