



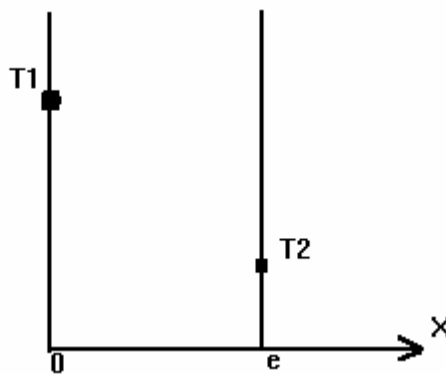
LTP : Laboratoire de Technologie des Poudres
Prof. H. Hofmann

I. EXERCICES DE PHÉNOMÈNES DE TRANSFERT DE CHALEUR

1. Une paroi d'une surface de 5 m^2 a une température de 700 °C d'un côté et de 20 °C de l'autre. Calculer la conductivité et l'épaisseur du mur. Utiliser la figure 7.9 (chapitre 7) pour le choix d'un matériau qui garantisse une densité de flux de chaleur de 300 kW/m^2 . L'épaisseur max. possible est de 50 cm , $k \neq f(T)$.

2. Déterminer le profil de température dans un mur avec les paramètres suivants:

$$\begin{aligned} x=0; & T_1 = 1000\text{ °C} \\ x=e; & T_2 = 200\text{ °C} \\ e &= 1\text{ m} \end{aligned}$$



a) $k = 1\text{ W/m°C} = \text{constante}$

b) $k(T) = k_0 + k_1 \cdot T$ avec $k_0 = k(200\text{ °C}) = 0,55\text{ W/mK}$ et $k_1 = 0,025\text{ W/mK}^2$

Illustrer le résultat par un diagramme.

3. Un mur construit avec un matériau composite à matrice métallique a une épaisseur de 10 cm et une surface de 2 m^2 . Les matériaux utilisés sont de l'acier inox et du dioxyde de zirconium stabilisé.

Composition du composite: 5% en masse de céramique

Densités: $\text{ZrO}_2\ 6\text{ g/cm}^3$, Acier $7,8\text{ g/cm}^3$

Conductivité des matériaux: Acier inox: $18,8\text{ W/mK}$; ZrO_2 : 2 W/mK .

Supposer que la conductivité est constante et utiliser la valeur en $T_0 = 400\text{ °C}$.

a) Calculer $k_{\text{composite}}$ à $T = 400\text{ °C}$.

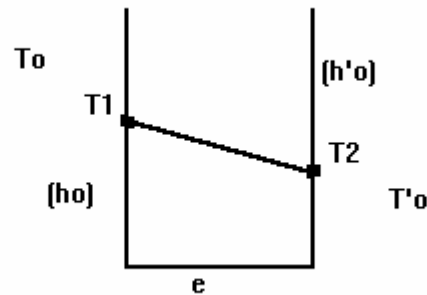
b) Calculer la densité du flux de chaleur (avec $k_{\text{composite}}(400\text{ °C}) = \text{constante}$) pour les cas suivants:

$T_0 = 500\text{ °C}$ en $x = 0$

$T_1 = 300\text{ °C}$ en $x = 0,1\text{ m}$

c) Calculer le flux de chaleur, si on remplace les particules de céramique par le même volume de pores. ($k = k(400\text{ °C}) = \text{constante}$).

4. a) Calculer la densité du flux et les températures T_1 et T_2 d'un mur d'une épaisseur de 10 cm.
 b) On double l'épaisseur de ce mur : que deviennent les pertes (q) et les températures T_1 et T_2 ?



$$T_0 = 500^\circ\text{C}; h_0 = 20 \text{ W/m}^2\text{K}; T'_0 = 20^\circ\text{C}; h'_0 = 5 \text{ W/m}^2\text{K}; k = 1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

5. a) Encore une fois un mur. Le mur est composé de:

Briques réfractaires: $e_1 = 10 \text{ cm}$; $k_1 = 1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

D'un isolant: $e_2 = 2 \text{ cm}$; $k_2 = 0,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

$T_1 = 1100^\circ\text{C}$, $T_3 = 20^\circ\text{C}$.

Calculer q et T_2 .

- b) Supposer que l'isolant (e_2) ne supporte pas 740°C ; on propose le garnissage suivant, de même épaisseur totale:

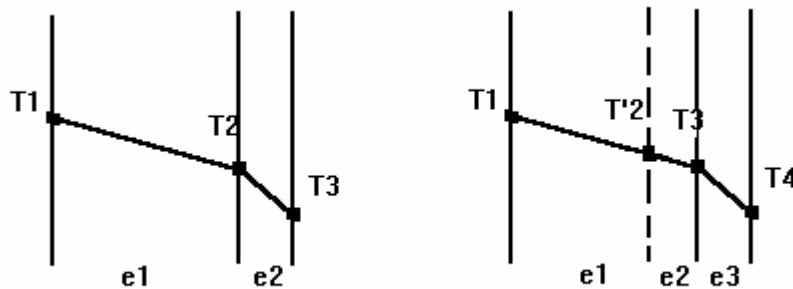
Briques réfractaires: $e_1 = 7 \text{ cm}$, $k_1 = 1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Isolant réfractaire : $e_2 = 3 \text{ cm}$; $k_2 = 0,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Isolant: $e_3 = 2 \text{ cm}$; $k_3 = 0,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

$T_1 = 1100^\circ\text{C}$, $T_4 = 20^\circ\text{C}$

Calculer q , T'_2 , T_3 et faire une comparaison avec des résultats de a).



6. Problème d'un mur simple avec production de chaleur:

Supposons qu'il y ait production de chaleur en son milieu. La température est imposée sur une face et le flux sur l'autre.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = -\frac{\dot{q}_p}{k}$$

$$T = T_0 \quad \text{si } x = 0$$

$$q = q_1 \quad \text{si } x = e$$

Quelle est la température de la face arrière? (Equation)

7. La paroi d'un échangeur de chaleur est constituée d'une plaque de cuivre de 9,5 mm d'épaisseur. Les coefficients d'échange de chaleur sur les deux côtés de la plaque sont 2340 et 6100 kcal/hm²°C correspondant respectivement aux températures 82 °C et 32 °C du fluide. En supposant que la conductivité thermique de la paroi est 344,5 kcal/hm°C, évaluer la densité du flux de chaleur et calculer la température des surfaces.
8. Dans une barre cylindrique de diamètre d, constituée d'un métal de résistivité électrique ρ_{el} et de conductivité thermique k, circule un courant électrique I.
- Calculer la puissance calorifique dégagée par effet Joule par unité de volume.
 - Calculer la différence entre la température de la surface extérieure et celle de l'axe du cylindre. Indiquer comment cette différence varie avec la nature du métal, le diamètre de la barre et l'intensité du courant.

Application numérique: d = 1 cm, I = 500 A

a) Cas d'une barre en cuivre : $\rho_{el} = 1,7 \mu\Omega\text{cm}$, $k = 0,1 \text{ kcal/ms}^\circ\text{C}$

b) Cas d'une barre en graphite : $\rho_{el} = 1,4 \cdot 10^3 \mu\Omega\text{cm}$, $k = 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ kcal/ms}^\circ\text{C}$

9. Une paroi semi-infinie avec des arêtes $x = 0$, $x = L$, $y = 0$ et $y = \infty$ est soumise aux conditions aux limites suivantes:
- $x = 0$; $T = 0$
 - $x = L$; $T = 0$
 - $y = \infty$; $T = 0$
 - $y = 0$; $T = T_A \sin(\pi x/L)$ (T_A est constante)
- Donner une expression pour $T(x,y)$

10. Une plaque d'aluminium (0,5 x 30 cm), à une température de 500°C, doit être refroidie à 90°C dans un bain d'eau. Les coefficients de transfert de chaleur sont:

$$T = 500 - 260 \text{ }^\circ\text{C} \quad h = 510 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T = 260 - 90 \text{ }^\circ\text{C} \quad h = 2550 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Les propriétés de Al: } k = 237 \text{ W/m}^\circ\text{C}, C_p = 900 \text{ J/}^\circ\text{C kg}; \rho = 2702 \text{ kg/cm}^3$$

- Calculer le taux de refroidissement au moment où la température est de 315°C.
- La même chose pour $T = 150^\circ\text{C}$.
- Calculer le temps nécessaire à un refroidissement jusqu'à 120°C.

11. Une barre cylindrique fabriquée en acier inox, avec un diamètre de 10 cm, a une température homogène de 200°C. La barre est refroidie par de l'air en mouvement à 25°C.

$$h = 142 \text{ W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}, \alpha = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, k = 15,5 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

Estimer le temps pour un refroidissement du centre de la barre à 35°C.
A ce moment, quelle est la température superficielle?

12. Un cylindre d'acier inox (diamètre = 2 cm, $T_i = 900^\circ\text{C}$) est refroidi dans l'eau ($T = 25^\circ\text{C}$).

a) Calculer la température superficielle après 1, 2, et 5 s.

b) Comparer les résultats avec ceux d'un refroidissement dans l'huile à la même température.

($h_{\text{acier/eau}} = 4500 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$; $h_{\text{acier/huile}} = 1700 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$,

Pour l'acier : $\rho = 7,78 \text{ g/cm}^3$, $C_p = 444 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$; $k = 15,5 \text{ W/mK}$)

13. Une plaque d'aluminium d'épaisseur 5 cm, à une température de 500°C , doit être refroidie à 90°C dans un bain d'eau. Le coefficient de transfert de chaleur est:

$$h = 2550 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Les propriétés de l'Al: $k = 237 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, $C_p = 900 \text{ J/}^\circ\text{C kg}$, $\rho = 2702 \text{ kg/m}^3$

Calculer la température au centre de la plaque 10 s après le début du refroidissement.

14. Calculer le temps de solidification pour:

a) une plaque d'épaisseur 10 cm (100 x 100 x 10 cm)

b) une sphère de diamètre 10 cm

Matériau:	Fe avec 4 % C
T_f	: 1148°C
Chaleur de fusion	: 246 J/g
Densité solide	: $7,0 \text{ g/cm}^3$
Densité liquide	: $6,6 \text{ g/cm}^3$
C_p du liquide	: $760 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

Moule (sable)	
C_p	: $1500 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
k	: $0,8 \text{ W/m}^\circ\text{C}$
Densité	: $1,6 \text{ g/cm}^3$

15 . Dans un cylindre de 4 cm de diamètre circule de l'air à la vitesse moyenne de 26,5 m/s. Calculer le coefficient de transfert de chaleur h sachant que:

$$\begin{aligned}\rho &= 1,2 \text{ kg/m}^3 \\ C_p &= 0,24 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \\ \eta &= 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s} \\ k &= 6,2 \cdot 10^{-6} \text{ kcal/m s }^\circ\text{C} \\ \text{Nu} &= 0,023 \text{ Re}^{0,8} \text{ Pr}^{0,4}\end{aligned}$$

16. Un tuyau horizontal 60 mm de diamètre extérieur, 52 mm de diamètre intérieur, transportant de la vapeur saturée à 3,8 bars est recouvert d'un isolant en amiante moulé de 5 mm d'épaisseur. Évaluer les pertes de chaleur vers l'air ambiant à 21°C pour une longueur de 1 m. La conductance par unité de surface côté vapeur est $9760 \text{ kcal/hm}^2 \text{ }^\circ\text{C}$ et la vitesse moyenne est de 3 m/s. La conductivité thermique de l'amiante est $k = 0,14 \text{ kcal/hm}^\circ\text{C}$. On admettra que la température T (en $^\circ\text{C}$) de vapeur saturée et reliée à la pression p (en bar) par la relation $p = (0,01T)^4$.

17. Détermination de la vitesse du son dans un gaz (Analyse dimensionnelle)

Les paramètres déterminants pour la vitesse du son, a , sont:

ρ : masse spécifique, p : pression, η : viscosité

L'équation cherchée est de la forme: $f(a, \rho, p, \eta) = 0$

- Combien y a-t-il de grandeurs?
- Combien y a-t-il de dimensions?
- Combien y a-t-il de paramètres sans dimension?
- déterminer la loi de la vitesse du son dans un gaz?

18. Quel est le flux élémentaire total émis par un corps noir dans l'angle solide $d\omega$ (direction D)?**19. Des produits de combustion emplissent un four de hauteur $L = 1,5\text{m}$. La pression totale P_t est 2 atm, la composition du gaz est :**

CO_2 : 15 % H_2O : 20 % N_2 : 65%

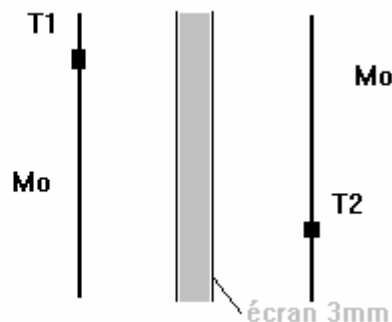
et la température du gaz est 1500°C . La paroi du four émet un flux de 1160 kW/m^2

- Calculer l'émissivité ε_c (dans le sens vertical) et le coefficient d'absorption du gaz α_c (vis-à-vis de ce flux), lié au CO_2 .
- Calculer l'émissivité ε_e (dans le sens vertical) et le coefficient d'absorption du gaz, α_e (vis-à-vis de ce flux), lié à la vapeur d'eau.
- Calculer l'émissivité ε_g et le coefficient d'absorption α_g du gaz avec la composition donnée ci-dessus.

20. Problème d'écran

On insère entre deux plans (à T_1 et T_2) un écran. Quelles seront les températures superficielles de ce dernier et les valeurs du flux échangé (sans et avec écran), en régime permanent? ε_{Mo} à $2000\text{ K} = 0,21$, ε_{Mo} à $600\text{ K} = 0,06$

Matériau : Molybdène poli,
 $T_1 = 2000\text{ K}$
 $T_2 = 600\text{ K}$
 épaisseur d'écran: 3 mm.

**21. Problème de thermocouple:**

Un thermocouple est posé entre deux parois infinies.

Paroi 1 : oxyde d'aluminium à 800°C

Paroi 2 : Graphite à 950°C

L'espace entre les deux plaques est rempli par de l'azote sous une pression de 1,67 bars.

La distance entre les deux plaques est de 0.9 m, le thermocouple se trouve 30 cm au-dessus de la surface 2.

Calculez la température du thermocouple (pas de convection ou conduction)



II. EXERCICES DE PHÉNOMÈNES DE TRANSFERT DE MATIÈRE

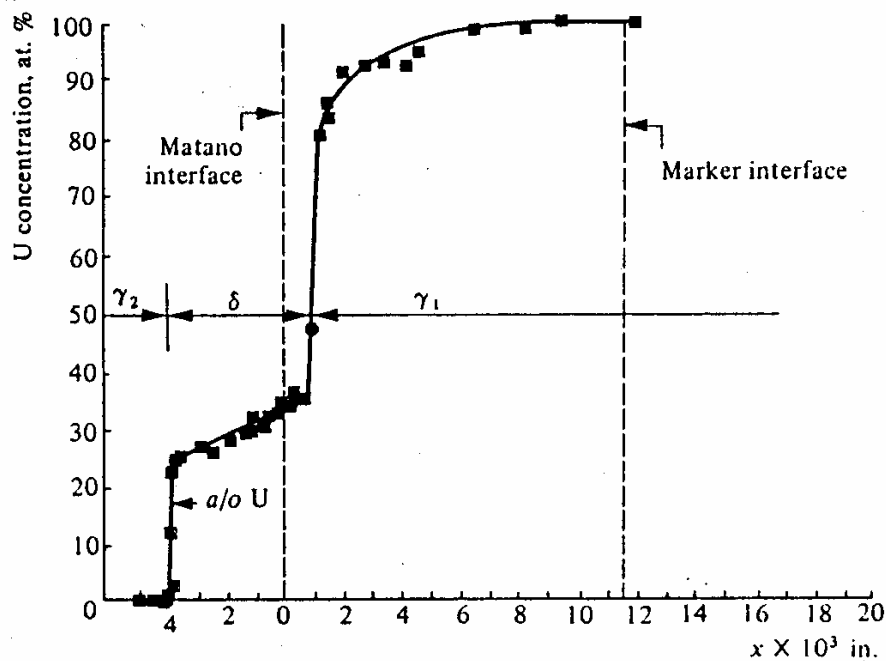
22. Prédiction du profil de concentration à partir du diagramme d'équilibre de phases.

Quel profil de la concentration s'établit-il dans le Système Ag - Al à une température de traitement thermique de 795 K? (Cf diagramme de phase à la dernière page)
(Dessinez une représentation schématique)

23. Écrire les équations pour calculer $c(x,t)$ et dessiner le profil de concentration du carbone dans un acier pour différentes durées de traitement thermique.
La concentration superficielle est constante.

- a) Atmosphère oxydante
- b) Atmosphère avec Méthane

24. Couple de diffusion de U - Nb. Traitement thermique: $T = 800^\circ\text{C}$ pendant 48 jours.
Déterminer le coefficient de diffusion D pour $c_U = 90\%$.



From N. L. Peterson and R. F. Ogilvie, *Trans. AIME* **218**, 439 (1960).

- 25.** a) Calculer le profil de concentration du carbone dans le fer, concentration de C ($c_0 = 0$) après 1, 4, et 10 h si on admet une concentration de carbone sur la surface $c_s = 2$ at-% C qui reste constante. Température: 1000°C , $D_c = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{s}$.
b) Déterminer une fonction pour $c_c = 1\% \text{ C} = f(t)$ (analytique ou graphique).

26. Déterminer D pour une structure CFC (cubique à face centrée) à partir de la théorie atomique de la diffusion.

Théorie atomique de la diffusion

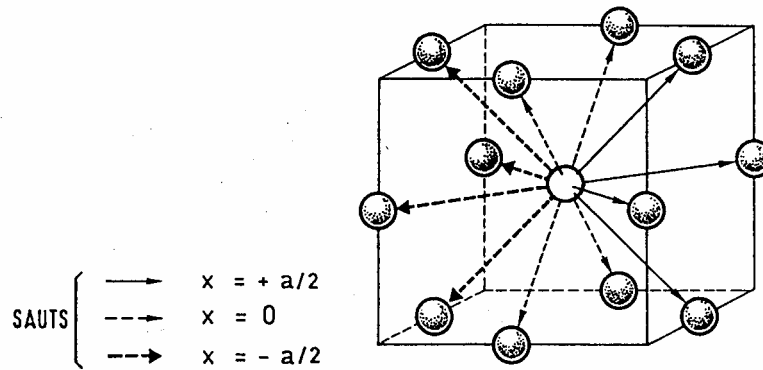


Fig. II.5. — Maille de la structure cubique à faces centrées ; sauts vers les 12 premiers voisins.

27. Diffusion de l'hydrogène:

Dans un container rectangulaire, on a stocké de l'hydrogène gazeux sous une pression élevée. Le matériau du container est de l'acier d'épaisseur 10 mm. La concentration d'hydrogène dans la surface interne est 1 kmol/m^3 . La concentration d'hydrogène sur la surface externe est négligeable. Le coefficient de diffusion de H dans l'acier est: $0,26 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$.

Quelle est le flux molaire de l'hydrogène dans l'acier?

28. Coefficient d'autodiffusion:

Une couche de Co radioactif est déposée sur la surface d'une pièce de Cobalt. A partir des profils de la radioactivité on a mesuré les coefficients d'autodiffusion suivants:

Table 1 Self-diffusion coefficient in cobalt.

T / K	D / m ² s ⁻¹	T / K	D / m ² s ⁻¹
1743	3.07×10^{-13}	1371	5.02×10^{-16}
1718	1.46×10^{-13}	1348	3.28×10^{-16}
1630	6.01×10^{-14}	1337	2.89×10^{-16}
1630	5.34×10^{-14}	1318	2.43×10^{-16}
1580	2.57×10^{-14}	1318	2.41×10^{-16}
1578	2.67×10^{-14}	1299	1.07×10^{-16}
1548	1.73×10^{-14}	1286	1.18×10^{-16}
1548	1.64×10^{-14}	1261	6.31×10^{-17}
1517	8.29×10^{-15}	1243	2.80×10^{-17}
1498	5.88×10^{-15}	1219	2.46×10^{-17}
1482	4.77×10^{-15}	1200	1.66×10^{-17}
1477	4.22×10^{-15}	1192	9.51×10^{-18}
1461	3.11×10^{-15}	1178	6.69×10^{-18}
1461	2.92×10^{-15}	1127	2.21×10^{-18}
1441	2.29×10^{-15}	1102	1.00×10^{-18}
1422	1.64×10^{-15}	1058	2.52×10^{-19}
1419	1.96×10^{-15}	1027	9.83×10^{-20}
1418	1.75×10^{-15}	1017	6.98×10^{-20}
1400	1.16×10^{-15}	980	3.33×10^{-20}
1398	1.22×10^{-15}	944	4.38×10^{-21}
1381	6.62×10^{-16}	923	2.06×10^{-21}
1371	5.41×10^{-16}	923	1.82×10^{-21}

a) Déterminer l'énergie d'activation du coefficient d'autodiffusion du Cobalt et donner une expression pour $D_{Co} = f(t)$.

29. Calculer la profondeur de la décarburation d'un acier avec 0,20 % C qui a été exposé pendant une année à une température de 510 °C sous une atmosphère très réductrice. L'acier a, sous les conditions normales, une microstructure biphasée (Ferrite et Fe_3C). La solubilité du C dans cet acier à 510 °C est 0,02 %C; le coefficient de diffusion de C est: $1,0 \times 10^{-9} \text{ cm}^2/\text{s}$.

30. Du bore est diffusé à partir d'une concentration superficielle constante dans une pièce de Si dopée à l'arsenic (As) avec 10^{16} atomes par cm^3 .

Comme la concentration superficielle est 10^{18} atomes/ cm^3 , quelle est l'épaisseur, en fonction du temps, à laquelle $C_{As} = C_B$? ($D_B = 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$).

31. Lors du dopage du Si par du P pour produire un semi-conducteur, une fine couche de P ($e = 1 \times 10^{-6} \text{ m}$) est déposée à la surface d'une barre semi-infinie de Si par CVD (Chemical Vapor Deposition). P diffuse dans le silicium à une température de 1000 °C pendant 5h. Au bout de cette durée, à quelle profondeur la fraction molaire X_p de phosphore atteint-elle la valeur 0,001?

$D_p(1273 \text{ K}) = 1,2 \times 10^{-17} \text{ m}^2/\text{s}$; $\rho_P = 2000 \text{ kg/m}^3$; $\rho_{Si} = 2300 \text{ kg/m}^3$,

Masse moléculaire du P = 0,03097 kg/mole; Masse moléculaire du Si = 0,02809 kg/mole.

32. Un couple de diffusion, consistant en une barre de Cu, contenant 5 at.-% de Zn, soudée à une barre de cuivre contenant 25 at.-% de Zn, interdiffuse pendant 50 h à 900 °C. Le coefficient d'interdiffusion est supposé constant (indépendant de la concentration) et vaut $D = 2 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{s}$ à 900 °C. Des marqueurs ont été insérés à l'interface initiale au début de l'expérience et se déplacent pendant le processus de diffusion (effet de Kirkendall), pour atteindre une position où la fraction de Zinc vaut 20,205 at.-% au bout de 50 heures. Calculer le déplacement des marqueurs.

