

Travaux dirigés d'électrothermie

Exercice n° 1

Un four électrique est équipé de trois éléments chauffants identiques en Fe - Cr - Al associés en triangle. A la température de fonctionnement, la puissance du four est de 81 kW. Pour des raisons de durée de vie, les conditions d'utilisation sont limitées à une température égale à 1050 °C et à une densité de flux surfacique à $\varphi = 1 \text{ W cm}^{-2}$. L'alimentation électrique est assurée par un réseau triphasé de tension $U = 380 \text{ V}$.

1. Calculer le diamètre D du fil.
2. Déterminer la longueur l de fil nécessaire pour constituer chacun des éléments chauffants.

On donne :

- résistivité de l'alliage à 20 °C : $\rho = 1,45 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$
 - coefficient moyen de température : $\alpha = 40 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
-

Exercice n° 2

Un four électrique est équipé d'une résistance chauffante en Ni-Cr. La puissance du four est de 4 kW à la température de fonctionnement de 1200 °C. Le fil résistant est boudiné selon une hélice de diamètre moyen $D_m = 6d$ où d est le diamètre du fil résistant. Le pas de l'hélice (altitude du point courant M après une rotation de 2π) est égal à $p = 3d$. L'alimentation électrique est assurée par un réseau de tension $U = 220 \text{ V}$

1. Calculer le diamètre d et la longueur l du fil nécessaire pour constituer la résistance.
2. Calculer le diamètre D et la longueur L de la résistance boudinée.

On donne :

- Résistivité du Ni-Cr à 1200 °C : $\rho = 1,171 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$.
 - Densité surfacique de puissance dissipée par la résistance : $\varphi = 20 \text{ kW m}^{-2}$.
-

Exercice n° 3

Pour chauffer un liquide on utilise les éléments chauffants à isolement minéral dont les caractéristiques sont les suivantes :

- diamètre extérieur : $d = 2,5 \text{ mm}$
- résistance électrique linéique
à la température de fonctionnement : $r = 10 \Omega \text{ m}^{-1}$
- densité de puissance maximale
tolérée à la surface de l'élément : $\varphi_0 = 400 \text{ kW m}^{-2}$
- tension d'alimentation : $U = 230 \text{ V}$

la puissance nécessaire au chauffage est $P_t = 5 \text{ kW}$.

Déterminer :

1. la longueur minimale d'un élément chauffant l_{min} ,
 2. le nombre N d'éléments chauffants à associer en parallèle,
 3. la longueur l de chaque élément chauffant.
-

Exercice n° 4

Pour chauffer un liquide contenu dans une cuve, on utilise des éléments chauffants immergés au sein du liquide. Chaque élément est constitué d'une résistance électrique dont les caractéristiques sont :

- diamètre extérieur : $d = 3,4 \text{ mm}$.
- résistance linéique à la température de fonctionnement : $r = 2,5 \Omega \text{ m}^{-1}$.
- densité de puissance maximale tolérable à la surface de l'élément :
 $\varphi_0 = 150 \text{ kW m}^{-2}$.
- tension d'alimentation : $U = 230 \text{ V}$.
- Puissance nécessaire au chauffage : $P = 5 \text{ kW}$.

Calculer :

1. La longueur minimale l_m et la longueur maximale l_{max} de l'élément chauffant.
 2. On prend $l = l_{max}$. Calculer la résistance R et la puissance P de cet élément. Conclure.
-

Exercice n° 5

On chauffe une barre d'acier par passage du courant électrique. Cette barre a une longueur de 1 m et une section circulaire de diamètre $d = 3,5$ cm.

L'installation de chauffage comporte :

- a) un circuit d'alimentation constitué de deux conducteurs de cuivre de 10^4 mm² de section et de longueur totale égale à 30 m ;
- b) un contact d'amenée du courant à chaque extrémité de la barre. La résistance électrique pour les deux contacts est de $2 \times 10^{-5} \Omega$.

Ce circuit est alimenté par le secondaire d'un transformateur dont le primaire est alimenté par un réseau alternatif de 380 V monophasé. Calculer :

1. La différence de potentiel aux extrémités de la barre et l'intensité du courant qui la traverse, sachant que la puissance qui lui est appliquée est de 200 kW ;
2. La puissance totale du circuit de chauffage à la sortie du transformateur en tenant compte du circuit d'alimentation et des contacts ;
3. La durée du chauffage. On écrira le bilan du chauffage en admettant que les déperditions thermiques dues au rayonnement thermique sont négligeables ;
4. La tension aux bornes de l'enroulement secondaire du transformateur sachant que le facteur de puissance du circuit est $\cos(\varphi) = 0,65$;
5. La puissance active, la puissance apparente et l'intensité du courant dans le circuit primaire du transformateur, sachant que le rendement de ce transformateur est de 97 % et que son facteur de puissance est égal à 1.

On donne :

Acier	masse volumique	$\varrho = 7900 \text{ kg m}^{-3}$
	chaleur massique	$c_P = 0,60 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
	résistivité électrique	$\rho_a = 1,26 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$
Cuivre	résistivité électrique	$\rho_c = 1,70 \times 10^{-8} \Omega \text{ m}$

Température ambiante $\theta_a = 10^\circ\text{C}$

Température de chauffage de la barre $\theta_c = 1260^\circ\text{C}$

Exercice n° 6

Humidification de l'air par chauffage électrique

Pour humidifier l'air, on peut utiliser soit l'évaporation naturelle (petit récipient, rempli d'eau placé contre la paroi d'un radiateur) soit l'évaporation par chauffage électrique par conduction directe (système plus performant et plus rapide).

L'appareil étudié ici est constitué par un récipient cylindrique de diamètre $D = 35 \text{ cm}$. Ses parois sont en matière électriquement isolante. Il est rempli d'eau de faible conductivité électrique dans laquelle plongent deux plaques rectangulaires distantes de $e = 2 \text{ cm}$. Ces électrodes sont reliées à une source de tension égale à 220 V .

Les deux plaques sont considérées suffisamment proches pour que le volume d'eau compris entre elles soit faible par rapport au volume total d'eau contenu dans le récipient. On admet, dans ces conditions, que le courant électrique ne passe que dans le volume d'eau compris entre les plaques. Le passage du courant produit alors par effet Joule un échauffement qui provoque l'évaporation progressive de l'eau.

A l'instant initial ($t_0 = 0$) les électrodes sont plongées dans l'eau sur une hauteur $h_0 = 10 \text{ cm}$. Du fait de l'évaporation, le niveau baisse avec le temps de fonctionnement jusqu'à une hauteur d'immersion égale à $h_1 = 2 \text{ cm}$ où l'on procède au remplissage jusqu'à la hauteur h_0 .

La température de l'eau, au cours du fonctionnement, est de 50°C . On demande de :

1. Calculer la résistance $R(h)$ du conducteur électrique formé par le volume d'eau compris entre les électrodes en fonction de la hauteur d'immersion h . Exprimer cette résistance en fonction de la résistance R_0 correspondant à la hauteur h_0 que l'on calculera.

2. Calculer la puissance mise en jeu en fonction de la hauteur h . L'exprimer en fonction de la puissance P_0 correspondant à la hauteur h_0 que l'on calculera.
3. Ecrire le bilan thermique élémentaire correspondant à l'évaporation d'un volume d'eau dV , la hauteur d'immersion étant h . En déduire le temps que met le niveau d'immersion pour passer de la hauteur h_0 à une hauteur $h(t) < h_0$.
4. Calculer les valeurs de la hauteur d'immersion h pour des valeurs de temps égales à 1 h, 2 h, 5 h, 10 h, 20 h. Calculer les valeurs du temps pour des hauteurs d'immersion égales à 2 cm et à 0 cm (électrodes découvertes).
5. Calculer l'énergie électrique consommée, la puissance maximale P_{max} et la puissance moyenne P_{moy} au cours d'un cycle (passage de h_0 à h_1).

On donne :

largeur des électrodes	: $l = 2,5 \text{ cm}$
résistivité de l'eau à 50°C :	: $\rho_e = 10 \Omega \text{ m}$
masse volumique de l'eau à 50°C	: $\rho = 988 \text{ kg m}^{-3}$
chaleur latente de vaporisation de l'eau à 50°C	: $L = 2383 \text{ kJ kg}^{-1}$

Exercice n° 7

On utilise un thermoplongeur électrique pour chauffer l'eau contenue dans un bac parallélépipédique dont les dimensions intérieures sont les suivantes :

Longueur : $L = 2 \text{ m}$ largeur : $l = 0,5 \text{ m}$ hauteur : $h = 1,2 \text{ m}$

Les parois ont une épaisseur $e = 3 \text{ mm}$. Il repose sur le sol et est ouvert à l'air libre. On négligera les déperditions thermiques à travers le fond du bac.

Calculer :

1. La puissance P_1 pour porter en 4 heures la température de l'eau de 20 à 80°C sachant que la hauteur de l'eau dans le bac est à $h_0 = 1 \text{ m}$.
2. La puissance P_2 pour assurer un débit d'eau chaude de 20 L h^{-1}

On donne :

* Déperditions thermiques surfaciques de l'eau à 80 °C :

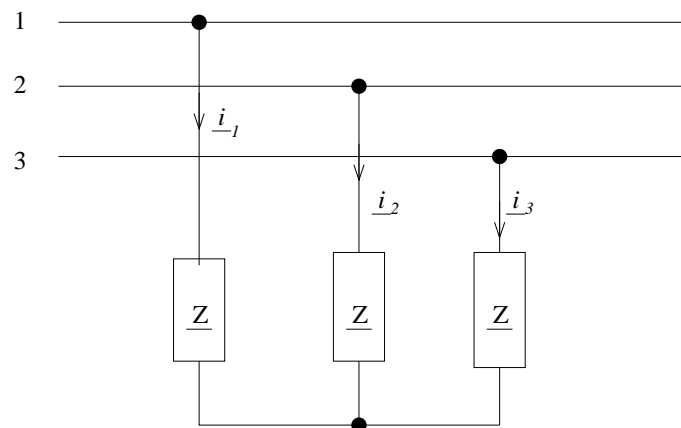
— A la surface de l'eau $\varphi_e = 5,8 \text{ kW m}^{-2}$

— Sur les parois : $\varphi_p = 0,5 \text{ kW m}^{-2}$

- * Acier : masse volumique : $\rho_{acier} = 7910 \text{ kg m}^{-3}$
 chaleur massique : $c_P^{acier} = 0,46 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- * Eau : masse volumique : $\rho_{eau} = 998 \text{ kg m}^{-3}$
 chaleur massique : $c_P^{eau} = 4,18 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Exercice n° 8

Un récepteur triphasé équilibré est alimenté en étoile par un alternateur triphasé à trois conducteurs, de tension efficace $U = 220 \text{ V}$. Les trois branches du récepteurs ont une impédance $\underline{Z} = 5\sqrt{2}(1 + j)$. La tension e_1 est prise comme origine des phases.



1. Déterminer le module et la phase des courants \underline{i}_1 , \underline{i}_2 et \underline{i}_3 .
 2. Déterminer les puissances active, réactive et apparente.
 3. Déterminer le facteur de puissance du système.
-

Exercice n° 9

Une cuve cylindrique, en nickel-chrome de diamètre intérieur $d = 0,5$ m, de hauteur utile de chauffage $h = 0,5$ m, d'épaisseur $e = 1,5$ mm et de conductivité électrique $\rho = 1,17 \times 10^{-6} \Omega \text{ m}$, est utilisée pour chauffer un liquide.

La puissance de chauffage, produite par un passage direct du courant électrique à travers la paroi latérale de la cuve, est de 50 kW.

Les points de connexion, pour l'alimentation électrique, sont situés à la partie supérieure et à la partie inférieure de la cuve.

Déterminer :

1. la tension d'alimentation.
2. l'intensité du courant électrique.

Exercice n° 10

On souhaite étudier le comportement thermique de couches minces de matériaux métalliques. Pour ce faire, on va chauffer une couche de silicium (Si) avec un laser Argon. Cette couche se présente comme un cylindre d'épaisseur $e = 100 \mu\text{m}$, de diamètre $d = 1$ cm.

Pour chauffer la cible en silicium, on focalise à sa surface un laser de puissance optique $P = 100$ mW, modulé selon un signal rectangulaire à une pulsation $\omega = 100 \times 10^3 \text{ rad s}^{-1}$. On considère que le laser forme une tache de 250 nm de diamètre à la surface de l'échantillon, et qu'il y est entièrement absorbé.

On nomme *diffusivité thermique*, et on note D , une caractéristique du matériau définie comme $D = \frac{\lambda}{\rho C_p}$. On considère que lorsqu'on chauffe à une pulsation ω un matériau de diffusivité D , la chaleur se propage depuis la source sur une distance $R = \sqrt{\frac{2D}{\omega}}$.

1. En quelle unité la diffusivité thermique s'exprime-t-elle ?
2. Calculez la diffusivité thermique du silicium.
3. Évaluez le volume de la zone chauffée par le rayonnement laser.
4. Calculez la masse de Si correspondante.
5. Calculez l'échauffement moyen subi par cette zone pour chaque période de chauffage laser.

6. À quelle pulsation faut-il monter pour que la chaleur se propage sur moins de $1\ \mu\text{m}$? Quel est alors l'échauffement de la zone ?

On donne :

Masse volumique du Si : $\rho = 2330\ \text{kg m}^{-3}$

Conductivité thermique du Si : $\lambda = 148\ \text{W m}^{-1}\ \text{K}^{-1}$

Capacité calorifique di Si : $C_p = 700\ \text{J kg}^{-1}\ \text{K}^{-1}$

Exercice n° 11

On souhaite réaliser une réaction de fusion nucléaire en laboratoire, en utilisant la technique appelée *Fusion par Confinement Inertiel* (FCI). Pour ce faire, on chauffe une petite bille de réactif (Deutérium-Tritium, ou DT) à l'aide de 240 faisceaux laser convergents.

Les impulsions laser durent 20 ns, et l'énergie totale fournie par l'ensemble des lasers vaut 1,8 MJ. Cet apport d'énergie sur un temps bref doit permettre d'amener l'échantillon à une température autorisant la fusion des deux composants du réactif DT, afin d'obtenir de l'hélium.

- Calculer la puissance de l'ensemble des lasers. Quelle est la puissance de chaque laser ?
- Calculer la masse de la bille de DT.
- Calculer la température finale de l'échantillon.
- Quel est l'état final de l'échantillon ?

Diamètre de la bille 2,4 mm

Masse volumique du DT : $163,8\ \text{kg m}^{-3}$

Capacité calorifique du DT : $7249\ \text{J kg}^{-1}\ \text{K}^{-1}$

Chaleur latente de liquéfaction du DT : $49,31\ \text{J kg}^{-1}$

Chaleur latente de vaporisation du DT : $322,2\ \text{J kg}^{-1}$

On souhaite faire évaporer par laser de petites billes de métaux. Pour ce faire, on doit sélectionner le laser adéquat, puis déterminer la durée de l'impulsion laser qui fera fondre le matériau.

On dispose de trois lasers différents : un laser Hélium-Néon (He-Ne) émettant une puissance de 500 W à 632 nm, un laser argon (Ar) émettant

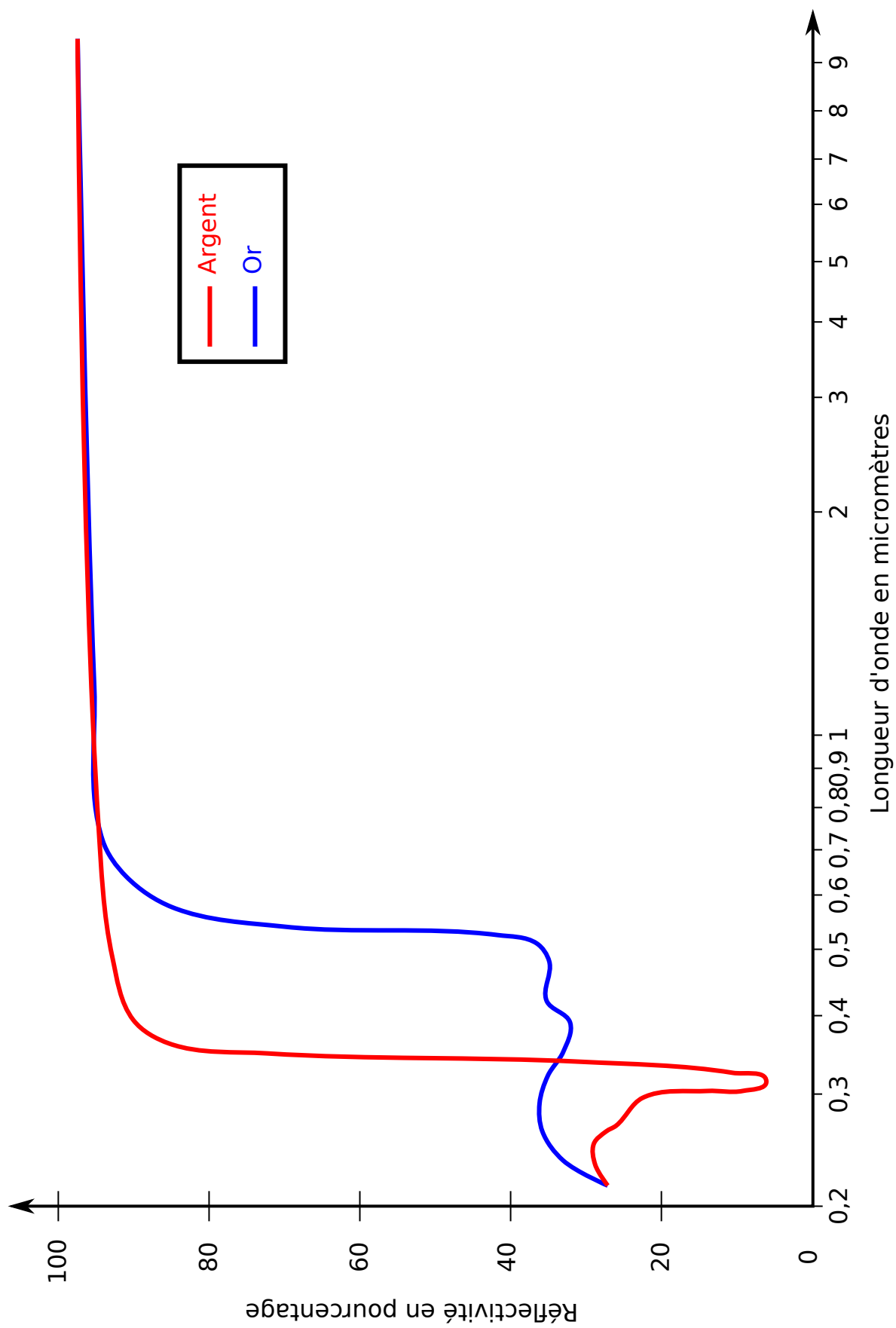
une puissance de 800 W à 514 nm, et un laser Krypton (Kr) émettant 1000 W à 416 nm.

Dans un premier temps, on s'intéressera à des billes d'or d'une masse de 10 g.

1. Quel laser allez-vous choisir pour obtenir la plus grande puissance d'échauffement ?
2. Combien de temps vous faudra-t-il pour faire fondre la cible d'or ? Pour la vaporiser ?
3. Mêmes question si vous souhaitez cette fois-ci vaporiser 10 g d'argent.
4. Dans les applications d'usinage de métaux, on utilise d'ordinaire des lasers CO_2 , dont la longueur d'onde d'émission est de 10,6 μm . Pourquoi ?

Données sur les métaux :

Matériau	Masse volumique (g cm^{-3})	Capacité calorifique ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)	T_{fusion} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{vap}
Or	19,3	128	1064	
Argent	10,5	234	962	
Cuivre	8,96	380	1085	
Aluminium	2,7	897	660	



Exercice n° 12

Une installation de soudage par induction haute fréquence effectue la soudure de 30 t/h de tubes en acier. Ces tubes ont un diamètre intérieur de 82 mm et une épaisseur de 2,6 mm. On demande de calculer :

1. (a) La vitesse de défilement v du tube en m/mn.
- (b) La vitesse équivalente v_e définie à partir de la relation $v = v_e f f_d$ où f est un facteur de correction dû à la nature du matériau, et f_d un facteur de correction dû au diamètre du tube.
- (c) La puissance nécessaire à mettre en œuvre.
2. On remplace les tubes en acier par des tubes en aluminium de 50 mm de diamètre intérieur et de 2 mm de d'épaisseur. Déterminer la production horaire sachant que l'on utilise la même installation.

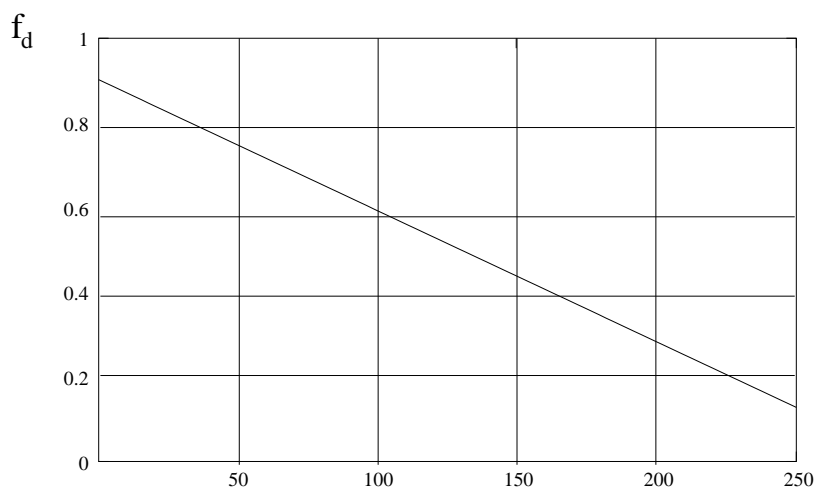
On donne :

- masse volumique de l'acier : 7860 kg m^{-3}
- masse volumique de l'aluminium : 2700 kg m^{-3}
- facteur de correction en fonction du matériau :

Matériau	f
Aluminium	1,4
Zinc	1,2
Laiton	1,1

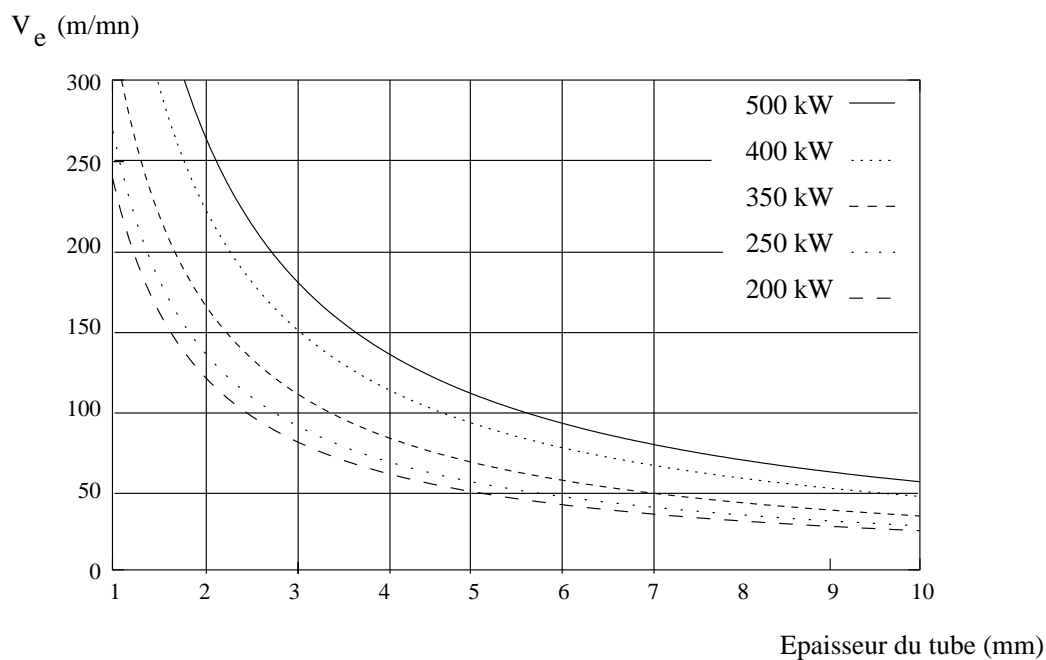
Matériau	f
Acier	1
Cuivre	0,8
Acier inoxydable	0,6

- facteur de correction f_d en fonction du diamètre du tube :



Diamètre intérieur du tube en mm

— puissance en fonction de l'épaisseur du tube et de la vitesse équivalente :



Exercice n° 13

On brase par induction deux rubans de laiton, d'épaisseur b , pour fabriquer une bande d'épaisseur $2b$. On suppose que la brasure a une épaisseur et une chaleur massique négligeable.

Profondeur de pénétration : $\delta = \sqrt{\frac{\gamma}{\pi f \mu_0 \mu_r}}$

Puissance dissipée dans un conducteur cylindrique par courants induits :

$$P = \frac{2\pi^2 R}{h} \sqrt{10^{-7} \rho \mu_r f} I^2$$
