

<i>CHAPITRE 7 : PHÉNOMÈNES THERMIQUES DUS AUX FROTTEMENTS</i> .....	- 7.1 -
<i>7.1. Introduction : Température de surface</i> .....	- 7.1 -
<i>7.2. Transfert de chaleur.</i> .....	- 7.2 -
<i>7.3. Source de chaleur mobile sur une surface.</i> .....	- 7.4 -
<i>7.3.1. Basse vitesse : <math>Ja \leq 0.1</math></i> .....	- 7.4 -
<i>7.3.2. Vitesse intermédiaire : <math>0.1 \leq Ja \leq 5</math>.</i> .....	- 7.5 -
<i>7.3.3. Vitesse rapide : <math>5 \leq Ja \leq 100</math> (contact hertzien)</i> .....	- 7.5 -
<i>7.3.4. Vitesse très élevée : <math>Ja &gt; 100</math>.</i> .....	- 7.7 -

**7.1. Introduction : Température de surface**

On se préoccupe maintenant de l'échauffement local des surfaces de frottement et de la distribution de la chaleur immédiatement sous la surface des pièces.

La chaleur de frottement naît à l'extrémité des aspérités en contact. Elle est ensuite transmise au corps des pièces par conduction. Il s'établit un champ de température dans les pièces et dans les aspérités. Appelons  $T_{s1}$  et  $T_{s2}$  les températures de surface des aspérités; on admet qu'elles sont égales au point de contact, donc :  $T'_{s1} = T'_{s2}$ .

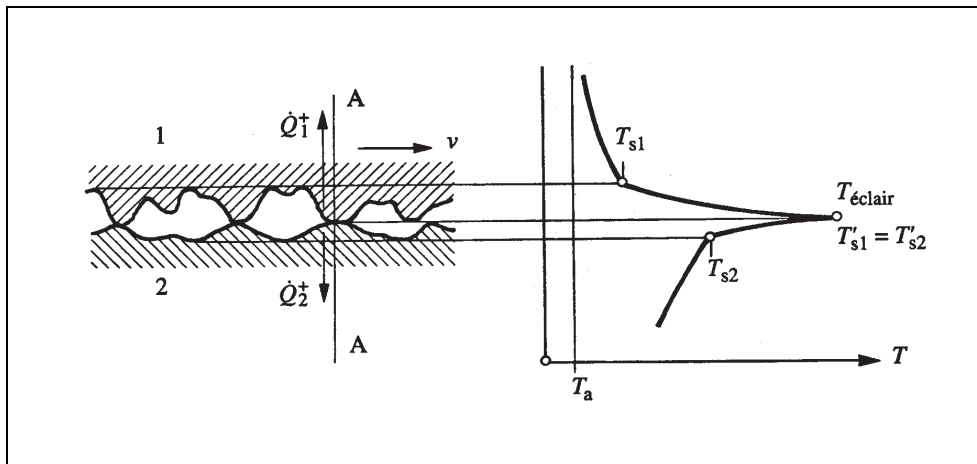


fig. 7.1. - Distribution des températures au contact de deux solides en frottement.

La figure ci-dessus montre le profil de température dans un plan A-A, la température commune de contact est la plus élevée. Le contact des aspérités est fugitif au cours du mouvement, comme l'est l'échauffement des aspérités, c'est pourquoi on appelle température-éclair la plus haute température de surface atteinte au cours du frottement.

Le gradient de température dans les aspérités est intense à cause de la petite section qu'elles offrent à la transmission de la chaleur. En outre, vu la brièveté des contacts d'aspérité, il est extrêmement difficile de mesurer la température-éclair effective. Les mesures donnent plutôt la température de surface à la base des aspérités, c'est-à-dire les valeurs  $T_{s1}$  et  $T_{s2}$ .

Les calculs d'échauffement de surface développés ci-après reposent sur l'hypothèse que :

$$T_{s1} \approx T_{s2}$$

Il faut se souvenir que cette égalité suppose que la chute de température est pareille dans les aspérités des deux surfaces et qu'elle ne donne pas la température-éclair à l'extrémité des aspérités. Cette dernière est en effet beaucoup plus élevée lors du mouvement, elle peut atteindre le point de fusion de l'un ou même des deux matériaux conjugués et entraîner le soudage des pièces lors du grippage. Cette constatation est à la base du dimensionnement au grippage des organes de machines.

## 7.2. Transfert de chaleur

On rencontre des organes de machines où une surface frotte constamment contre une autre. C'est par exemple le cas des plateaux d'un limiteur de couple qui patine longtemps contre les garnitures.

Le frottement engendre le flux producteur de chaleur :

$$\dot{q} = \mu_k p w \quad [W/m^2]$$

<u>Notations</u> :	$\mu_k$	coefficient de frottement cinétique	-
	$p$	pression apparente de contact	$N/m^2$
	$w$	vitesse de glissement	$m/s$

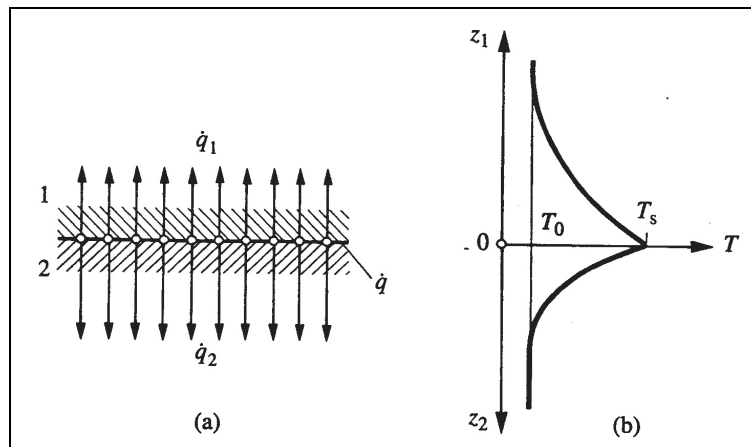


fig. 7.2. - Répartition de la chaleur : (a) flux de chaleur; (b) température.

Ce flux se répartit entre les deux corps (1) et (2) de manière tel que :

$$\dot{q} = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 \quad (\text{éq. 7.4})$$

Supposons que les deux solides aient la même température  $T_0$  avant le début du frottement, l'échauffement de leur surface résulte immédiatement de la formule des corps semi-infinis (condition de Neumann) (voir § 5.3.3.) :

$$\begin{cases} T_{s1} - T_0 = \dot{q}_1 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{t}}{b_1} \\ T_{s2} - T_0 = \dot{q}_2 \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{t}}{b_2} \end{cases} \quad (\text{éq. 7.5})$$

<u>Notation</u> :	$T_s$	température de surface	$K$ (ou $^{\circ}C$ )
-------------------	-------	------------------------	-----------------------

### Remarque :

La formule développée ci-dessus est seulement valable pour un contact parfait entre les 2 solides.

Comme expliqué au paragraphe précédent, on admet que les deux surfaces ont approximativement la même température :

$$T_s = T_{s1} = T_{s2}.$$

En égalant les deux expressions ci-dessus, on trouve le rapport des flux de chaleur :

$$rap_\phi = \frac{\dot{q}_1}{\dot{q}_2} = \frac{b_1}{b_2}$$

Avec l'équation (7.4.), le flux de chaleur pénétrant dans chaque corps vaut :

$$\begin{cases} \dot{q}_1 = \frac{b_1}{b_1 + b_2} \dot{q} \\ \dot{q}_2 = \frac{b_2}{b_1 + b_2} \dot{q} \end{cases} \quad (\text{éq. 7.8.})$$

L'apport calorifique se distribue entre les deux corps proportionnellement à leur coefficient d'arrachement thermique.

*Le corps d'un couple tribologique qui reçoit la plus grande part de la chaleur de frottement est celui qui présente la plus grande valeur du coefficient de pénétration de la chaleur  $b$ .*

On obtient enfin **l'échauffement des surfaces** en portant ces expressions dans (éq. 7.5.) :

$$T_s - T_0 = \dot{q} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{t}}{(b_1 + b_2)} \quad (\text{éq. 7.9.}) \quad \{Réf. 15\}$$

Il faut tenir compte du temps de passage au travers des rugosités des surfaces des deux corps en présence; on en conclut que la température des rugosités d'un corps frottant sur un antagoniste suppose parfaitement lisse est d'autant plus basse que le facteur  $b$  du corps lisse est plus élevé; ainsi, face aux antifrictions à base d'étain et plomb revêtant les coussinets, il faut un maneton en acier possédant un état de surface parfait. Cette précaution étant prise, il faut refroidir le matériau possédant le plus haut coefficient d'arrachement thermique.

Ainsi, lors de l'usinage d'une pièce en aluminium, le copeau emmagasine plus de chaleur que l'outil, et si le copeau et l'outil restent longtemps en contact, l'outil s'échauffe; en tournant très vite, le copeau est centrifugé et le contact avec l'outil reste court.

Par ailleurs, la quantité de chaleur reçue par unité de temps par unité de surface d'une pièce en déplacement sous charge, donc son échauffement, varie comme le produit ( $T A_d$ ) de la température de contact par l'aire qui défile devant cette unité de surface (surface cinématique) durant l'unité de temps : il s'ensuit l'intérêt de chromer les segments de moteurs, le chrome étant un matériau dont le point de fusion est élevé, et ceci bien que le coefficient  $b$  du chrome soit supérieur à celui de la fonte.

*En cas de surfaces de frottement inégales, la chaleur se répartit proportionnellement à l'aire de la surface cinématique. On veillera à refroidir efficacement la pièce dont le produit  $b \times$  surface cinématique est le plus grand.*

### 7.3. Source de chaleur mobile sur une surface

De nombreux organes de machines voient les zones de frottement se déplacer à la surface des pièces: cames et suiveurs, balais sur des bagues de contact, freins à sabot ou à disque, engrenages. Le bref passage d'une source de chaleur sur une pièce ne lui permet naturellement pas d'atteindre la température de régime permanent calculée précédemment.

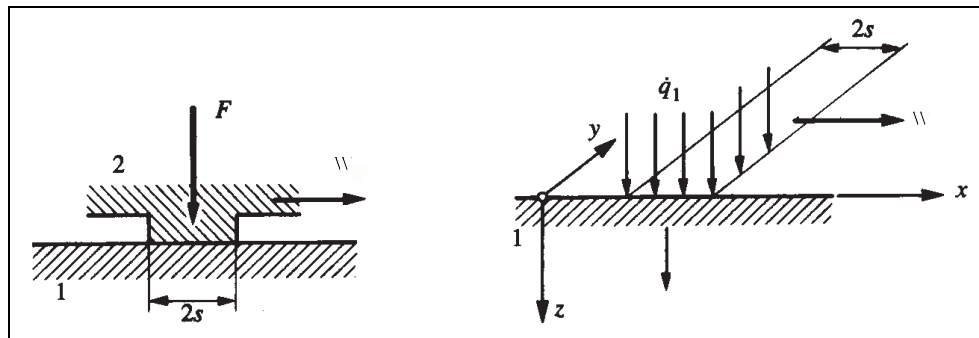


fig. 7.3. - Déplacement d'un contact rectangulaire et déplacement d'une source de chaleur.

Une pièce (2) frotte sur une autre (1) avec une vitesse de glissement  $w$ . La surface de contact constitue une source de chaleur mobile à la surface du corps (1). Le flux de chaleur engendré :  $\dot{q} = \mu p w$  est donc distribué sur la surface comme la pression.

Un élément de la surface (1) s'échauffe au passage de la source de chaleur, puis se refroidit à nouveau. Il est évident que l'échauffement sera moins important si le passage est bref. L'étude conduit à des intégrales qui ne peuvent pas se calculer analytiquement, mais on peut trouver des solutions approchées suffisamment précises pour la pratique. Elles dépendent de la vitesse de glissement vis-à-vis de la vitesse de propagation de l'onde thermique dans le solide présentant la plus grande surface de glissement, en l'occurrence le corps (1).

Définissons le nombre de Jaeger de la manière suivante :

$$Ja = \frac{w l_p}{2 a_{fixe}} \quad (\text{éq. 7.13.})$$

<u>Notations :</u>	$w$	vitesse de déplacement relatif du solide	$m/s$
	$l_p$	longueur caractéristique du contact	$m$
		- soit la demi-largeur	
		- soit le rayon (si contact circulaire)	
	$a_{fixe}$	diffusivité thermique du matériau du solide immobile	$m^2/s$

On distingue quatre domaines de vitesse.

#### 7.3.1. Basse vitesse : $Ja \leq 0.1$

La vitesse de déplacement dans ce domaine est :  $w \leq 0.2 \frac{a_1}{s}$

Par exemple, pour de l'acier,  $a_1 = 16 \cdot 10^{-6} m^2/s$  ; nous avons :

si :  $2 l_p = 20 \text{ mm} \Rightarrow w = 3.2 \cdot 10^{-4} m/s$ ,

si :  $2 l_p = 0.2 \text{ mm} \Rightarrow w = 3.2 \cdot 10^{-2} m/s$ .

On voit que *ce domaine de vitesse est très lent*, il ne présente pratiquement pas d'intérêt en mécanique, car la production de chaleur est alors très faible.

La chaleur se propage de part et d'autre de la surface de contact, elle chauffe le corps à l'avant de la pièce en mouvement. On admet, avec une approximation suffisante, que l'échauffement est symétrique par rapport à l'axe central de la source; la répartition de la chaleur entre les deux corps et l'échauffement de surface peuvent se calculer par (éq. 7.8.) comme si la source de chaleur était immobile.

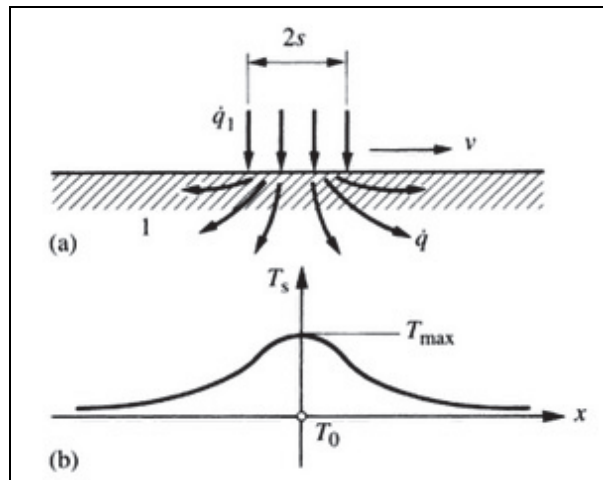


fig. 7.4. - Déplacement lent d'une source de chaleur uniforme:  
(a) flux de chaleur; (b) profil de température.

### 7.3.2. Vitesse intermédiaire : $0.1 \leq Ja \leq 5$

On doit calculer par une méthode numérique, car il n'existe pas de solution simple approchée.

### 7.3.3. Vitesse rapide : $5 \leq Ja \leq 100$ (contact hertzien)

Pour de l'acier, la vitesse est comprise entre 0.016 et 0.32 m/s si  $2s = 20\text{ mm}$  ou entre 1.6 et 32 m/s si  $2s = 0.2\text{ mm}$ .

La répartition de pression d'un contact hertzien est elliptique, mais on peut faire un calcul analytique de l'échauffement en approchant l'ellipse par une parabole. On suppose encore que le déplacement de la source de chaleur est assez rapide pour que l'échauffement soit nul devant la source et que toute la chaleur s'écoule sous la source, perpendiculairement à la surface du corps considéré comme étant semi-infini. ( $\dot{\bar{q}} \rightarrow \dot{q}_{\text{moyen}}$ )

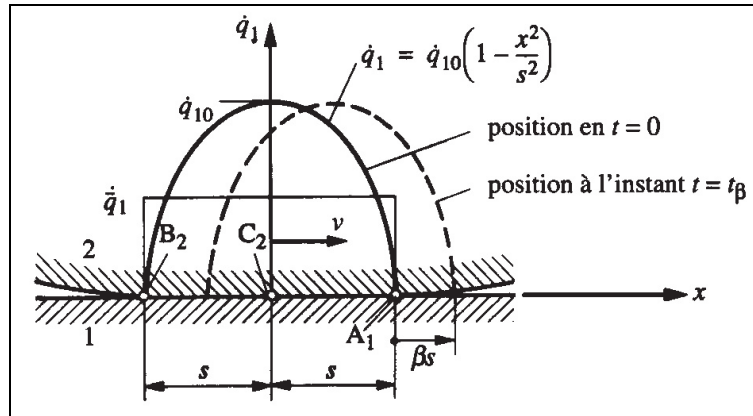


fig. 7.5. - Déplacement d'une source de chaleur.

A l'instant :  $t = 0$ , la source de chaleur se trouve dans une certaine position. Le point  $A_1$  et toute la surface de (1) devant ce point se trouvent à la température initiale  $T_0$  du corps (1).

La source de chaleur avance maintenant d'une quantité  $(\beta s)$ , référée à la demi-largeur de la bande de contact par le nombre relatif  $\beta$ , pendant le temps :  $t_\beta = \frac{\beta s}{w}$ .

Un élément de surface entourant le point  $A_1$  reçoit un flux de chaleur croissant jusqu'à ce que le point central  $C_2$  de la source de chaleur coïncide avec  $A_1$ , c'est-à-dire pour  $(0 \leq \beta \leq 1)$ . L'apport de chaleur diminue ensuite lorsque la zone  $B_2-C_2$  passe sur  $A_1$ . La température  $T_{1\beta}$  du point  $A_1$  à l'instant  $t_\beta$ , lorsque la source s'est déplacée de la distance  $(\beta s)$ , résulte d'un bilan thermique. Tous calculs fait, on trouve :

$$T_{1\beta} = T_0 + \frac{16}{15\sqrt{\pi}} \frac{\dot{q}_{10}}{\rho_1 c_1 w} \sqrt{\frac{s w}{4 a_1}} (5\beta - 2\beta^2) \sqrt{\beta} \quad (\text{éq. 7.26.})$$

La température évolue avec l'avance relative  $\beta$ , elle est maximale lorsque  $\beta = 1.5$ , c'est-à-dire en un point situé à mi-distance entre le milieu de la bande et le point de contact arrière  $B_2$ . La température maximale s'obtient pour cette valeur; après introduction du flux de chaleur moyen, on trouve :

$$T_{1\max} = T_0 + C \frac{\dot{q}_1}{b_1} \sqrt{\frac{2s}{w}} \quad (\text{éq. 7.28.})$$

où  $b_1$  est le coefficient de pénétration de chaleur du matériau (1). La quantité  $(2s/w)$  est le temps de passage de la source de chaleur sur un point de la surface. La courbe de température  $T_{1\beta}$  se déplace avec la source de chaleur, c'est pourquoi on lui donne le nom de température instantanée (flash temperature) qu'il ne faut pas confondre avec la température-éclair à la pointe des aspérités.

Une intégration numérique donne :

$C = 1.11$  pour une distribution elliptique,

$C = 1.17$  pour une distribution parabolique

$C = 1.13 = (2/\sqrt{\pi})$  lorsque la distribution de chaleur est uniforme.

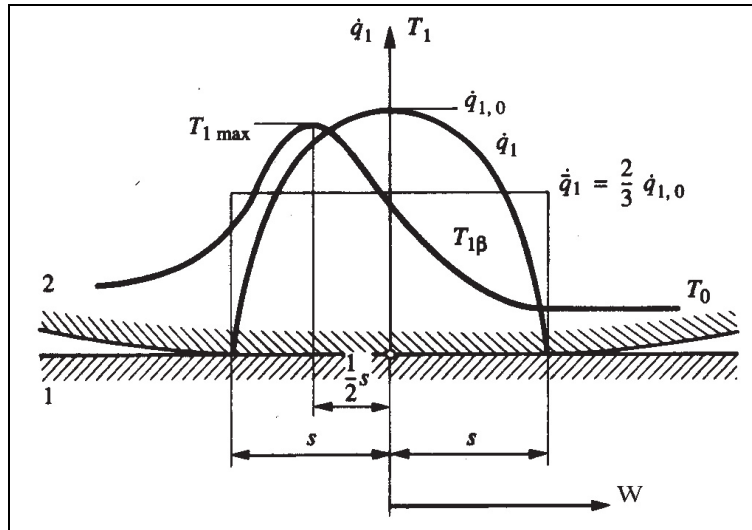


fig. 7.6. - Température de la surface du corps (1) de la figure 7.5.

Le flux de chaleur de frottement se répartit entre les pièces (1) et (2),

$$\dot{q} = \mu \bar{p} w = \dot{q}_1 + \dot{q}_2$$

En régime permanent de température, la chaleur  $\bar{q}_2$  pénètre toujours dans la pièce mobile (2) par la même surface. Par conséquent, l'intégrale de ce flux sur la surface de frottement correspond à la chaleur que cette pièce peut céder à l'ambiance. Si la pièce était isolée, on aurait  $\dot{q}_2 = 0$  et  $\dot{q}_1 = \dot{q}$ . On ne peut déterminer la température de surface et la répartition du flux de chaleur qu'en calculant l'échauffement global des pièces.

En remarquant que le flux de chaleur est proportionnel à la vitesse, la formule (éq. 7.28.) montre que l'échauffement est proportionnel à  $\sqrt{w}$ .

#### 7.3.4. Vitesse très élevée : $Ja > 100$

{Réf. 2}

La vitesse de propagation de la chaleur est négligeable vis-à-vis de la vitesse de la source de chaleur. Cela revient à imposer une densité de flux en surface (voir § 5.3.3. ainsi que (éq. 7.5.)).

Si on prend comme hypothèse que en  $z = 0$ ,  $T_{(0,t)1} = T_{(0,t)2}$ , on trouve, via (éq. 7.5.) :

$$\left. \begin{array}{l} \dot{q}_1 = \frac{b_1}{b_2} \\ \dot{q}_2 = \frac{b_2}{b_1} \end{array} \right\} \text{(éq. 7.40.)} \quad \text{ou} \quad \left. \begin{array}{l} \bar{Q}_1 = \frac{b_1}{b_2} \frac{A_1}{A_2} \\ \bar{Q}_2 = \frac{b_2}{b_1} \frac{A_2}{A_1} \end{array} \right\} \text{(éq. 7.41.)}$$

$A_1$  et  $A_2$  étant les aires de frottement, dites surfaces cinématiques, des pièces durant un cycle de fonctionnement.



**Application 7.1.** Un frein à disque doit dissiper  $Q = 100 \text{ kJ}$ . Ses caractéristiques sont :

- ▶ Surface de contact des deux plaquettes  $A_1 = 24 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
- ▶ Volume des plaquettes  $V_1 = 14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$
- ▶ Surfaces de frottement du disque  $A_2 = 400 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$
- ▶ Volume du disque  $V_2 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$

Les différentes constantes physiques des matériaux sont :

		Garniture	Acier	Unités
Masse volumique	$\rho$	2000	7860	$\text{kg/m}^3$
Chaleur massique	$c$	790	500	$\text{J/kgK}$
Coefficient de pénétration	$b$	1000	13000	$\text{Ws}^{0.5}\text{m}^2\text{K}^{-1}$

On admet que la chaleur est entièrement stockée dans les pièces, car le freinage est bref par rapport à leur constante de temps thermique. Une étude préliminaire montre que le frein fonctionne en régime de vitesse très rapide.

### Solution :

*Répartition du flux de chaleur*

La chaleur se répartit selon la loi  $\frac{\bar{Q}_1}{\bar{Q}_2} = \frac{b_1 A_1}{b_2 A_2}$  ( $Ja > 100$ ).

Sachant que  $\bar{Q} = \bar{Q}_1 + \bar{Q}_2$ , nous obtenons :

$$\bar{Q}_1 = \frac{b_1 A_1}{b_1 A_1 + b_2 A_2} \bar{Q} \quad \text{et} \quad \bar{Q}_2 = \frac{b_2 A_2}{b_1 A_1 + b_2 A_2} \bar{Q}$$

*Echauffements :*

Sachant que  $\bar{Q} = m c \Delta T$  :

$$\Delta T_1 = \frac{\bar{Q}_1}{V_1 \rho_1 c_1} \quad \text{et} \quad \Delta T_2 = \frac{\bar{Q}_2}{V_2 \rho_2 c_2}$$

*Calculs*

Le matériau de la garniture se trouve normalement sur les plaquettes et le disque est en acier. Le calcul donne :

$$\bar{Q}_1 = 4590 \text{ J} \quad \text{et} \quad \bar{Q}_2 = 99500 \text{ J}$$

$$\Delta T_1 = 21 \text{ K} \quad \text{et} \quad \Delta T_2 = 253 \text{ K}$$

Permutons les matériaux, les plaquettes en acier et un disque revêtu de garniture. On trouve :

$$\bar{Q}_1 = 43800 \text{ J} \quad \text{et} \quad \bar{Q}_2 = 56200 \text{ J}$$

$$\Delta T_1 = 796 \text{ K} \quad \text{et} \quad \Delta T_2 = 356 \text{ K}$$

On voit qu'il est nettement plus favorable de mettre les garnitures sur les plaquettes de serrage et de faire le disque en acier. L'échauffement des plaquettes serait intolérable si elles étaient en acier.

**Application 7.2. Exemple :** collecteur de machine électrique. Deux charbons frottent sur le collecteur en cuivre d'une machine électrique. On a l'aire des charbons (1),  $A_1 = 2 s l$  et l'aire du collecteur (2) frottant en un tour,  $A_2 = \pi d l$ . En outre :

$s = 25 \text{ mm}$  ;  $d = 150 \text{ mm}$  ;  $b_1 = 2952 \text{ W s}^{0.5} / \text{m}^2 \text{ K}$  ;  
 $b_2 = 35630 \text{ W s}^{0.5} / \text{m}^2 \text{ K}$  ;  $a_1 = 107 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s}$  ;  
 $w = 12 \text{ m/s}$ .

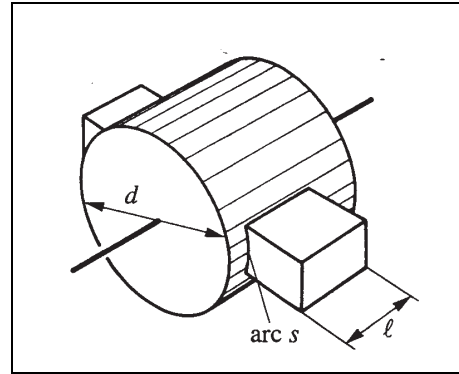


fig. 7.7. - Application 7.2.

**Solution :**

Calcul du nombre de Jaeger

$$Ja = \frac{l_p w}{2 a_1} = \frac{25 \cdot 10^{-3} \times 12}{2 \times 107 \cdot 10^{-7}} = 14018$$

Et donc dans la zone de vitesse élevée.

Calcul du flux

Cette valeur élevée conduit à appliquer la formule (éq. 7.41.) qui donne :

$$\bar{Q}_1 = \frac{b_1}{b_2} \frac{A_1}{A_2} \bar{Q}_2 = \frac{2952}{35630} \frac{50 \times l}{\pi \times 150 \times l} = 0.00879 \bar{Q}_2$$

La plus grande partie de la chaleur de frottement s'écoule vers le collecteur. Mais il ne faudrait pas croire que les charbons seront froids car, s'il est vrai qu'ils reçoivent peu de chaleur, ils sont petits et donc mal refroidis.