

EPREUVE COMMUNE DE TIPE – Partie D

TITRE :

ETUDE DU REFROIDISSEMENT D'UN DISQUE DE FREIN DE TGV PAR CALODUC

Temps de préparation : 2 h 15

Temps de présentation devant le jury : 10 minutes

Entretien avec le jury : 10 minutes

GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte au total 11 pages :

Document principal : 9 pages

Document complémentaire : annexe de 2 pages donnant quelques définitions utiles de notions qui sont en italique dans le document principal.

Travail suggéré au candidat :

- Faire une synthèse du document en insistant sur la démarche logique proposée par celui-ci depuis le problème posé jusqu'à la validation de la solution envisagée.

CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :

- Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.
- Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.
 - Vous pouvez écrire sur le présent dossier, le surligner, le découper... mais tout sera à remettre au jury en fin d'oral.
 - En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, etc..) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier, les transparents et les brouillons utilisés pendant la préparation. En entrant dans la salle d'oral, vous devez être prêts à débiter votre exposé.
 - A la fin de l'oral, vous devez remettre au jury le présent dossier, les transparents et les brouillons utilisés pour cette partie de l'oral, ainsi que TOUS les transparents et autres documents présentés pendant votre prestation.

ETUDE DU REFROIDISSEMENT D'UN DISQUE DE FREIN DE TGV PAR CALODUC

Le freinage des TGV (Trains à Grande vitesse) est obtenu actuellement par frottement de patins équipés de plots sur des disques qui sont solidaires des roues ; lorsque le train est à sa vitesse nominale et que le conducteur enclenche le système de freinage sur un temps très court, jusqu'à l'arrêt complet, chaque disque de frein doit évacuer une puissance calorifique telle que sa température peut atteindre 900°C sur certaines zones : les limites de ce qui est acceptable sont atteintes.

On peut alors imaginer de refroidir chaque disque par un caloduc interne dans le double but d'abaisser le niveau des températures atteintes par le disque en cas de freinage brutal et d'obtenir une répartition uniforme de celles-ci afin de limiter les contraintes thermiques dans le disque.

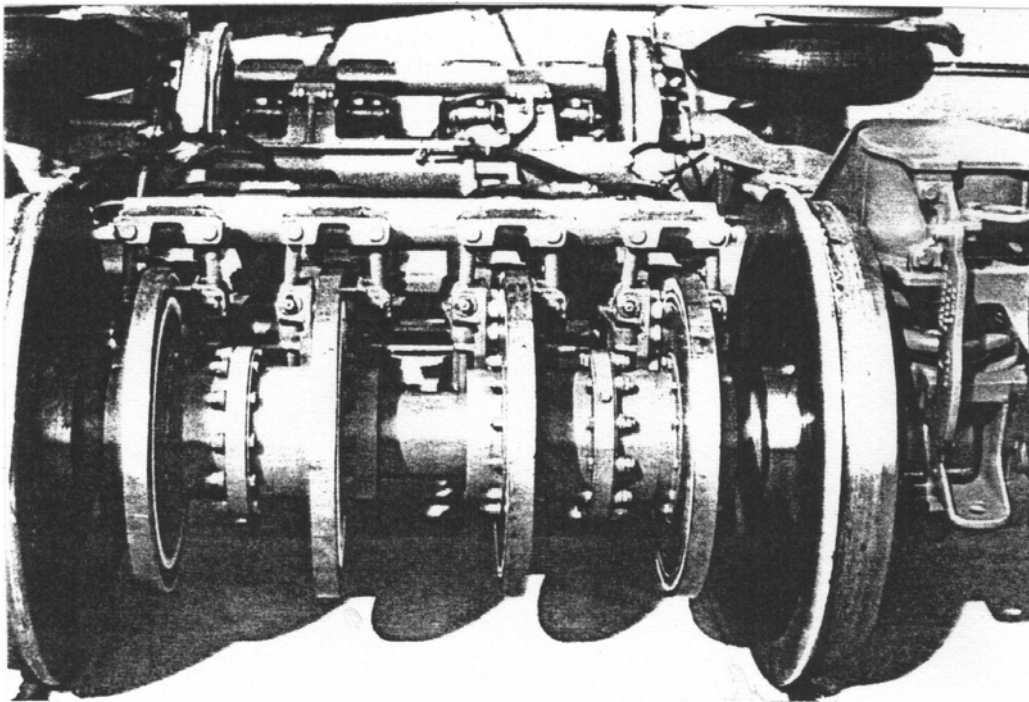


Photo d'un bogie de TGV équipé de 4 disques de frein par essieu.

Après avoir exposé les problèmes soulevés par le système de freinage du TGV, puis une description du principe de fonctionnement d'un caloduc, le présent document propose la conception d'un disque caloduc pour TGV, suivie de quelques essais comparatifs menés récemment dans un laboratoire de recherche, pour enfin conclure sur la validation et l'intérêt d'un tel dispositif.

1. POSITIONNEMENT DU PROBLEME :

Les disques de frein qui équipent le TGV actuel sont conçus sous forme de galettes non ventilées de 45 mm d'épaisseur, en acier allié à haute limite élastique ; leur diamètre extérieur est de 640 mm. En cours de freinage, chaque surface du disque reçoit un flux égal, uniformément réparti entre les diamètres 310 et 610 mm ; chaque disque est frotté par deux garnitures composées chacune de deux « haricots », de longueur radiale l_e égale à 150 mm ; chaque haricot comporte 9 plots en alliage fritté de rayon $r_p = 20$ mm, cette configuration apparaît sur la figure 1 :

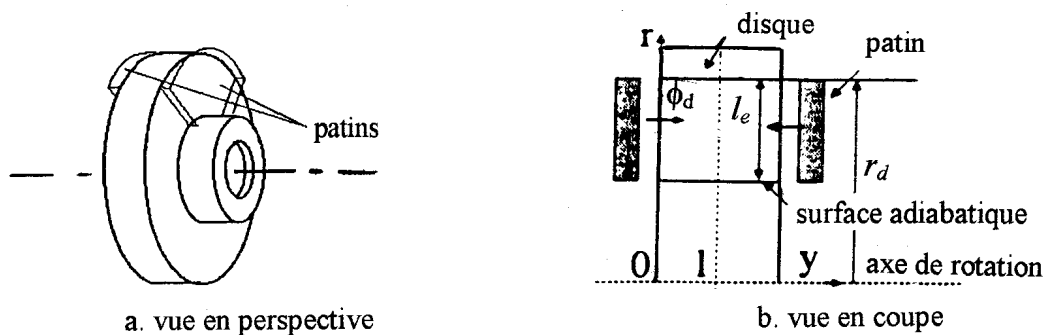


Figure 1 – Schémas du disque de frein

Lors du freinage du train pour passer de 320 km/h à 0, chaque disque doit absorber une énergie thermique E de 16 Mégajoules ; lorsqu'il s'agit d'un arrêt d'urgence, la durée du freinage vaut $\tau = 90$ s, ce qui conduit à une puissance thermique moyenne produite Q égale à :

$$Q = E / \tau = 178 \text{ kW}$$

Cette puissance dissipée à l'interface disque/frein se répartit entre la garniture et le disque selon la loi :

$$Q_p = n Q \text{ pour la garniture et } Q_d = (1 - n) Q \text{ pour le disque,}$$

avec $n = \frac{S_p \beta_p}{S_p \beta_p + S_d \beta_d}$ où S_p est la surface totale des patins ($S_p = 2 \times 9 \times \pi r_p^2 = 2,26 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$) et

35 S_d est la surface de frottement du disque ($S_d = 2\pi[(r_d^2 - (r_d - l_e)^2] = 1,74 \text{ m}^2$) ; β_p et β_d sont respectivement les *effusivités* du patin et du disque.

Pour une garniture frittée en FeCu : $\beta_p = 0,59 \cdot 10^4 \text{ Jm}^{-2}\text{Ks}^{1/2}$

Et pour l'acier : $\beta_d = 1,36 \cdot 10^4 \text{ Jm}^{-2}\text{Ks}^{1/2}$.

Ces valeurs entraînent la répartition suivante :

40 $Q_p = 997 \text{ W}$, ce qui conduit à une densité de flux de chaleur apparaissant sur les patins de $\phi_p = Q_p/S_p = 4,4 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$,

$Q_d = 177 \text{ kW}$, ce qui conduit à une densité de flux de chaleur sur les parois du disque de $\phi_d = Q_d/S_d = 10^5 \text{ W/m}^2$.

45 Ainsi, c'est le disque qui doit évacuer le flux de chaleur le plus élevé ; dans ces conditions, le disque peut atteindre des températures de l'ordre de 475°C , sans parler des taches chaudes qui apparaissent sur certaines zones, avec des températures atteignant 900°C !

2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN CALODUC :

50 Lorsque l'on recherche à transférer de la chaleur entre deux milieux séparés par une distance de quelques dizaines de centimètres à quelques mètres, on ne peut pas utiliser la simple *conduction thermique* au travers d'une paroi, le flux ainsi transmis à distance serait beaucoup trop faible.

55 On peut employer un fluide intermédiaire, qui prélève la chaleur au milieu chaud pour ensuite la restituer au milieu froid ; cette méthode qui existe dans le chauffage et la climatisation de locaux industriels, nécessite une pompe pour mettre en circulation dans un circuit fermé le fluide caloporteur. Réservée aux longues distances, celle-ci présente l'inconvénient d'un dispositif techniquement lourd, avec une maintenance adaptée, justifiée en particulier par les pièces tournantes.

60 Pour les distances moyennes (quelques dizaines de centimètres), on lui préfère les caloducs, pour leur simplicité de fonctionnement et leurs caractéristiques thermiques remarquables.

On appelle caloducs des enceintes fermées possédant la propriété de transférer de la chaleur dans des conditions exceptionnelles grâce à l'utilisation des phénomènes

65 d'évaporation et de condensation d'un fluide interne. La figure suivante (n°2) donne la constitution habituelle d'un caloduc :

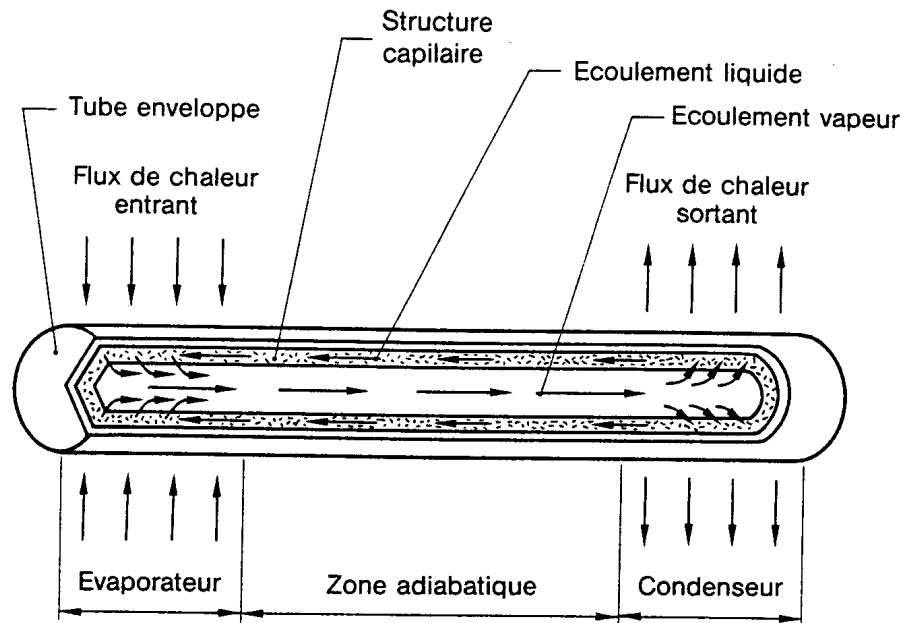


Figure 2 – principe du caloduc

Le caloduc est une enceinte étanche, souvent cylindrique dans les applications habituelles, qui contient un liquide en équilibre avec sa vapeur en l'absence totale d'air ou de tout autre gaz, dans la zone recevant de la chaleur de l'extérieur, zone appelée évaporateur, le
70 liquide s'évapore et la vapeur vient se recondenser dans la zone cédant de la chaleur à l'extérieur, zone appelée condenseur. La vapeur s'écoule de l'évaporateur vers le condenseur grâce à la surpression existant dans la zone de production de la vapeur ; pour que le condensat effectue le trajet inverse, il est nécessaire d'en provoquer l'écoulement : la solution
75 fréquemment adoptée consiste à utiliser l'effet de capillarité dû à un milieu poreux dont on tapisse la paroi interne du caloduc.

Pour assurer le retour du condensat, on utilise parfois une autre solution, particulièrement économique, qui consiste à disposer le caloduc dans une position inclinée, avec le condenseur situé à une altitude plus élevée que celle de l'évaporateur : ainsi c'est la
80 gravité qui entraîne le condensat par ruissellement capillaire sur la paroi interne.

Un cas particulier de cette configuration consiste à placer le caloduc en position verticale, on parle alors de caloduc thermosiphon, dont l'emploi concerne principalement des échangeurs air-air servant dans la climatisation, comme le montre la figure 3 :

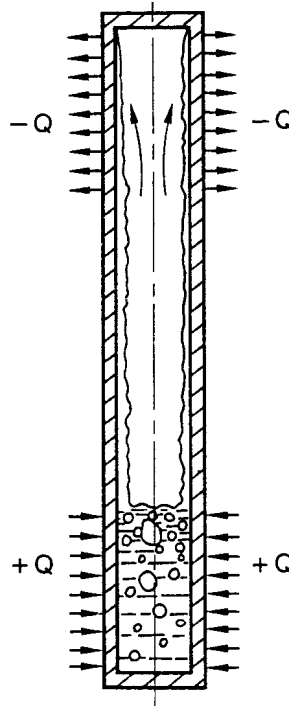


Figure 3 – caloduc thermosiphon vertical

Il est intéressant de connaître les ordres de grandeur des densités de flux de chaleur ainsi transférés par les caloducs : on atteint sans peine 10^7 W/m², c'est là le premier intérêt des caloducs, le second résidant bien sûr dans la différence de température extrêmement réduite entre les deux extrémités internes des caloducs.

90

3. CONCEPTION D'UN DISQUE CALODUC POUR TGV :

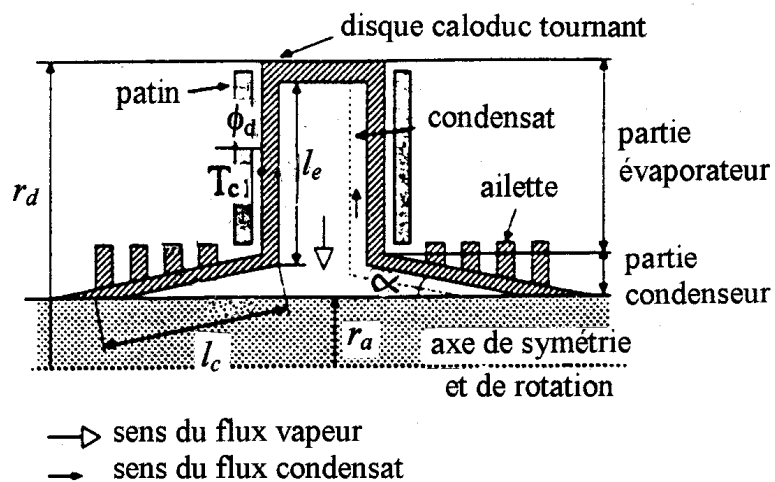


Figure 4 – Schéma du disque caloduc

95 On peut alors essayer de concevoir un disque de frein intégrant un caloduc dans le but
d'augmenter notablement l'évacuation de la chaleur au cours du freinage. Le schéma du
disque caloduc tournant est montré sur la figure 4.

100 Les rayons extérieur r_d et intérieur r_a du disque ainsi conçu sont respectivement égaux
à 305 mm et 148 mm ; les longueurs de l'évaporateur l_e et du condenseur l_c sont
respectivement égales à 150 mm et 200 mm ; l'angle α entre la surface du condenseur et l'axe
de rotation vaut 2° . L'épaisseur de la paroi est identique côté évaporateur et côté condenseur :
elle vaut 22,5 mm. Le disque caloduc a ainsi le double rôle de disque frein et de refroidisseur :
c'est un disque creux constituant une enceinte étanche contenant l'eau en équilibre avec sa
105 vapeur ; la partie du disque caloduc constituant l'évaporateur est celle dont la surface
extérieure frotte sur les plots ; le disque est en rotation autour de son axe de révolution et le
retour du condensat vers l'évaporateur le long de la paroi est assuré par les effets centrifuges ;
l'évaporateur et le condenseur sont séparés par une zone adiabatique ; la partie condenseur du
disque sera munie d'ailettes extérieures qui évacueront par *convection* dans l'air la chaleur
ainsi drainée dans la partie axiale du disque et qui constitueront l'aboutissement du processus
110 de transfert de la chaleur produite au niveau du frottement du frein.

Afin de mener une série d'essais, deux maquettes ont été réalisées à l'échelle 1/3 :

- un disque plein, de diamètre D de 200 mm, d'épaisseur e' de 7,5mm ; la largeur de la
couronne recevant le flux de chaleur vaut $l_e' = 62,5$ mm. Dans le cas réel, le frottement
115 s'effectue sur les deux faces du disque, aussi, pour respecter la symétrie dans le disque plein
par rapport au plan situé à demi-épaisseur du disque, on utilise un disque d'épaisseur moitié,
chauffé sur une face et isolé sur l'autre ; le schéma de ce disque est donné sur la figure 5. a.
- un disque caloduc de rayon extérieur $r_d = 100$ mm et intérieur $r_a = 30$ mm ; les longueurs l_e
de l'évaporateur et l_c du condenseur sont respectivement de 50 mm et 67 mm ; l'épaisseur e de
120 la paroi est constante et égale à 7,5 mm ; la partie condenseur comporte 22 ailettes d'épaisseur
1 mm et de hauteur $h_a = 20$ mm ; le fluide caloporteur est de l'eau , le schéma de ce disque
caloduc est donné sur la figure 5.b.

125

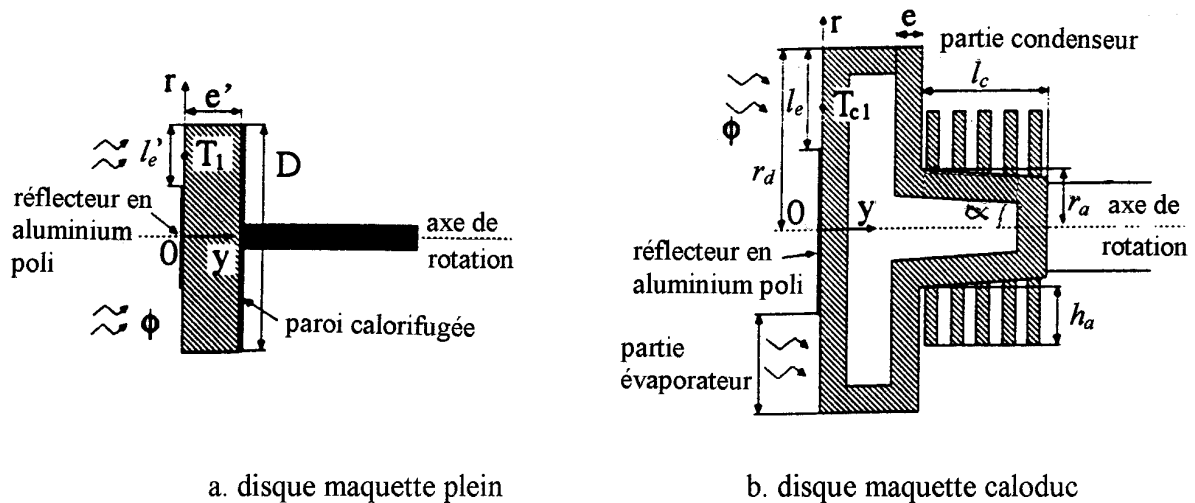


Figure 5 – Schéma des disques maquettes.

4. MESURES COMPARATIVES SUR BANC D'ESSAIS :

130 Le schéma du banc d'essais est donné sur la figure 6. A une extrémité de l'arbre de rotation est fixé le disque maquette ; les mesures de températures sont effectuées sur le disque en rotation à l'aide de thermocouples reliés à un collecteur tournant à anneau de mercure, assurant la transmission du signal et placé à l'autre bout de l'arbre ; le couple moteur est transmis par un système poulie-courroie placé entre deux paliers ; cet arbre de transmission doit également servir de passage pour les câbles des thermocouples ; ces derniers ont été implantés au sein même du disque ; le collecteur tournant relie les thermocouples à une centrale d'acquisition de données, pilotée par un ordinateur ; les températures sont ainsi enregistrées durant tout l'essai et stockées dans les fichiers.

135

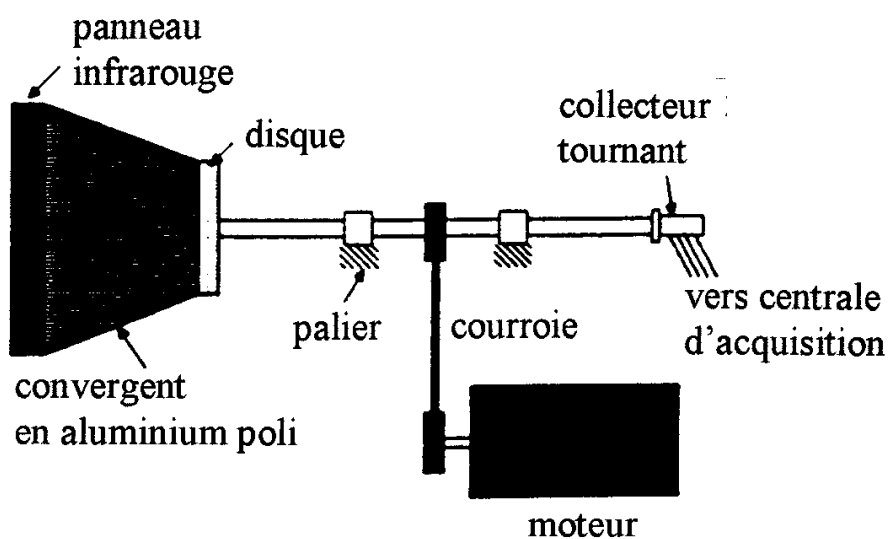


Figure 6 - Schéma du banc d'essais.

140 Sur le banc d'essais, le flux de chaleur reçu par le disque au cours du freinage est
simulé par un chauffage infrarouge court, il est constant pendant toute la durée de l'essai et
vaut 2050 W. Cela impose de placer le disque en bout d'arbre ; la cassette d'émetteurs
infrarouges servant au chauffage du disque est constituée de 9 tubes de 1 kW, dont la
température en régime nominal est de 1500°C ; son support la maintient au niveau du disque ;
145 le panneau radiant reste immobile au cours des essais ; pour favoriser les échanges radiatifs, il
est placé à 10 cm du disque, face à lui, et un convergent en aluminium poli, placé entre le
disque et le panneau radiant permet de concentrer le rayonnement sur le disque, les parois
forment donc avec le panneau et le disque une enceinte fermée. Pour simuler le flux de
frottement sur uniquement une couronne du disque, la surface centrale du disque est équipée
150 d'un réflecteur en aluminium poli circulaire, qui renvoie le flux de rayonnement provenant des
lampes infrarouges, et qui limite donc la zone de chauffage à une couronne.

Sur ce banc d'essais, ont donc été montés successivement le disque maquette plein et
le disque maquette caloduc, la vitesse de rotation de ces disques étant la même pour les deux
et égale à 1500 tr/mn. Les mesures obtenues pour les températures T_1 et T_{c1} mesurées sur la
155 paroi extérieure de chacun des disques (comme indiqué sur les figures 5.a. et b.), ont permis
de tracer les courbes de la figure 7 :

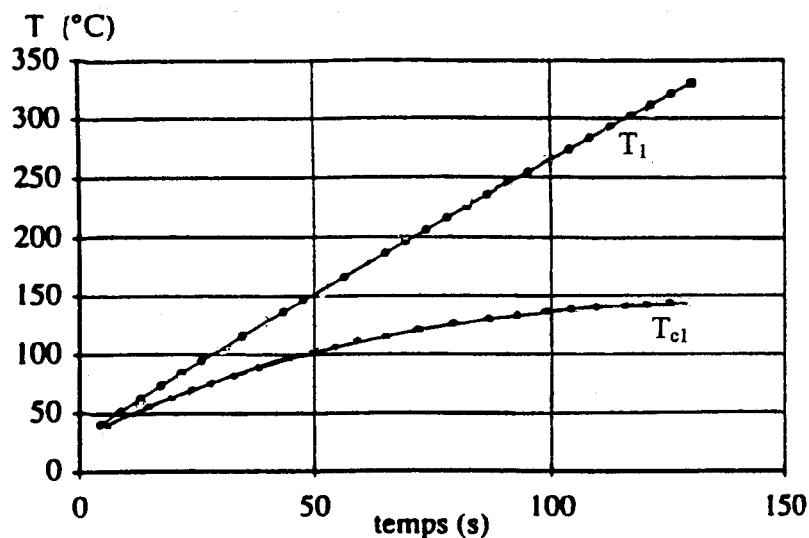


Figure 7 – Comparaison des températures sur les disques maquettes.

La comparaison de ces deux courbes montre l'efficacité du disque caloduc à évacuer la
chaleur, la température sur la face chauffée étant alors abaissée de $T_1 = 330^\circ\text{C}$ à $T_{c1} = 145^\circ\text{C}$ à
160 $t = 130\text{s}$.

5. CONCLUSION – VALIDATION :

La solution d'évacuer la chaleur générée au cours du freinage par disque caloduc paraît très prometteuse. Dans le but de confirmer les résultats expérimentaux obtenus sur les disques maquettes, une modélisation des transferts de chaleur sur les disques de frein du TGV a été menée afin de calculer les évolutions de température au cours du freinage, les résultats obtenus apparaissent sur la figure 8 :

170

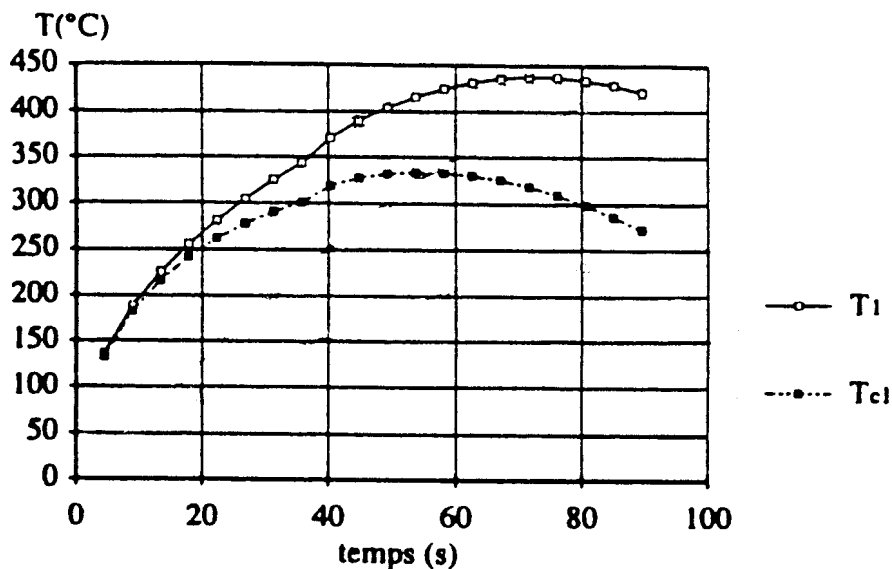


Figure 8 – Comparaison des températures calculées pour le disque plein (T_1) et le disque caloduc (T_{c1}) durant le freinage.

Cette comparaison a ainsi permis de confirmer l'efficacité du disque caloduc sans réseau capillaire à évacuer la chaleur générée au cours de freinage par rapport au disque de frein classique : la température maximale atteinte dans le disque au cours de freinage est abaissée de plus de 100°C.

175

ANNEXE

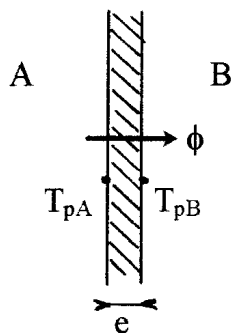
SUR LES DIFFERENTS MODES DE TRANSFERT DE CHALEUR.

Lorsque l'on examine les possibilités de transférer de la chaleur d'un milieu A (chaud) à un milieu B (froid), on constate qu'il existe 3 grands modes de transfert

1. Le transfert par conduction :

Ce mode utilise un milieu intermédiaire permettant de conduire la chaleur et caractérisé par son propre coefficient de conduction thermique λ .

Ainsi, lorsque l'on place une paroi d'épaisseur e entre deux milieux à températures différentes, la densité de flux de chaleur transmise au travers de la paroi obéit à la loi:

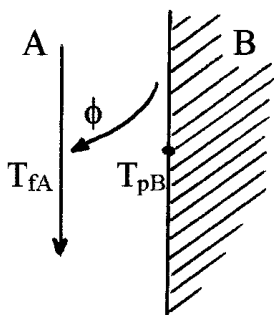


$$\phi = \frac{\lambda(T_{pA} - T_{pB})}{e}$$

où λ est le coefficient de conduction thermique de paroi et T_{pA} et T_{pB} sont les températures sur les surfaces de contact entre la paroi et chacun des deux milieux A et B.

2. Le transfert par convection :

Un fluide A (température T_{fA}) qui s'écoule le long d'une paroi B (température $T_{pB} > T_{fA}$), enlève un flux de chaleur par convection:

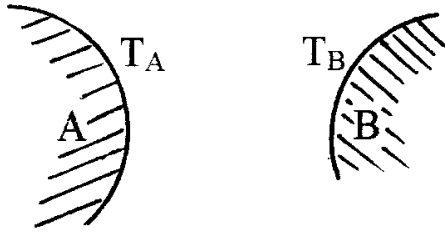


$$\phi = h(T_{pB} - T_{fA})$$

où h est le coefficient de transfert entre le fluide et la paroi, ce coefficient dépend des caractéristiques du fluide et de la paroi, ainsi que de la vitesse d'écoulement du fluide.

3. Le transfert par rayonnement :

Ce mode est fondé sur le phénomène suivant : toute surface extérieure d'un corps émet un rayonnement électromagnétique, dont l'intensité est directement fonction de la température de ce corps. Ainsi lorsque deux corps A et B sont en regard l'un de l'autre :



le corps A émet un flux de chaleur par rayonnement vers B (proportionnel à T_A^4) et inversement, le corps B émet un flux de chaleur par rayonnement vers A (proportionnel à T_B^4).

Si $T_A \gg T_B$, le bilan retient essentiellement le premier des deux flux pour caractériser le transfert par rayonnement de A vers B.

Effusivité thermique : arrachement de la chaleur par frottement

Lorsque deux matériaux ont un contact surfacique par frottement, on définit l'effusivité thermique β comme étant le coefficient d'arrachement de la chaleur par l'un des deux matériaux sur l'autre au voisinage de l'interface, β est fonction de 3 paramètres qui caractérisent le matériau concerné, au travers de la relation suivante :

$$\beta = (\lambda \rho C_p)^{1/2}$$
 où λ est le coefficient de conduction thermique, ρ la masse volumique et C_p la chaleur massique à pression constante.

Ainsi, dans le cas d'une garniture frittée de FeCu en frottement sur de l'acier, on peut bâtir le tableau suivant pour l'évaluation des effusivités :

| | Acier | garniture FeCu |
|--|-------------|----------------|
| ρ (kg.m ⁻³) | 7850 | 5250 |
| λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹) | 46 | 14 |
| C_p (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹) | 510 | 470 |
| β (J.m ⁻² .K ⁻¹ .s ^{-1/2}) | $1,36.10^4$ | $0,59.10^4$ |