



HAL
open science

Puissances axiales limités des caloducs a eau en fonctionnement vertical avec la pesanteur

Abdelkader Mojtabi

► **To cite this version:**

Abdelkader Mojtabi. Puissances axiales limités des caloducs a eau en fonctionnement vertical avec la pesanteur. *Letters in Heat and Mass Transfer*, 1978, 5 (2), pp.141-148. 10.1016/0094-4548(78)90028-0. hal-02002104

HAL Id: hal-02002104

<https://hal.science/hal-02002104>

Submitted on 31 Jan 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Open Archive Toulouse Archive Ouverte

OATAO is an open access repository that collects the work of Toulouse researchers and makes it freely available over the web where possible

This is an author's version published in: <http://oatao.univ-toulouse.fr/20670>

Official URL:

[https://doi.org/10.1016/0094-4548\(78\)90028-0](https://doi.org/10.1016/0094-4548(78)90028-0)

To cite this version:

Mojtabi, Abdelkader Puissances axiales limités des caloducs a eau en fonctionnement vertical avec la pesanteur. (1978) Letters in Heat and Mass Transfer, 5 (2). 141-148. ISSN 0094-4548

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository administrator: tech-oatao@listes-diff.inp-toulouse.fr

PUISSANCES AXIALES LIMITÉES DES CALODUCS A EAU
EN FONCTIONNEMENT VERTICAL AVEC LA PESANTEUR (*)

A. MOJTABI

Laboratoire d'Aérothermique du C.N.R.S
4 ter, route des Gardes F 92190 MEUDON

ABSTRACT

The purpose of the present paper is to determine experimentally the axial limitations of various types of copper heat pipes operating at vertical inclination.

For a vertical position, it appears, from our experimental study that the wick structure used over the evaporator does not affect the axial power limit. This power varies very little between this position and the 45° inclination to it.

Moreover, after a drying out of the evaporator, the heat pipe, which is in vertical position and gravity assisted, re-starts in operation.

1. Introduction

Un caloduc se présente généralement sous l'aspect d'une enceinte cylindrique fermée, la paroi de cette enceinte est tapissée par une structure capillaire. Les pores de cette structure sont occupés par un fluide caloporteur en phase liquide. La vapeur saturante de ce fluide occupe le reste du volume de l'enceinte.

La première étude théorique de ce système a été menée par T.P. Cotter[1] qui a déterminé la puissance capillaire limite du caloduc. Plusieurs études théoriques [2,3] ont été entreprises depuis lors pour mettre en évidence les différentes limitations axiales de fonctionnement du caloduc observées par plusieurs expérimentateurs [4,5]. J.E. Kemme[3] a montré que la puissance axiale atteint un maximum quand la vitesse de la vapeur à la sortie de l'évaporateur est égale à la vitesse du son (limite sonique). C.A. Busse[2] a démontré que la puissance axiale est maximale quand la pression de vapeur dans le condenseur est nulle (limite visqueuse). En ce qui nous concerne, nous avons vérifié [6] que les limites sonique et visqueuse, mesurées expérimentalement pour des caloducs utilisant des fluides caloporteurs métalliques [4], ne peuvent pas

(*) La partie expérimentale de ce travail a été effectuée à l'Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique, 86000 Poitiers.

être atteintes dans le cas du caloduc à eau. Par contre, lorsque le caloduc est chauffé sur une longueur suffisamment grande nous observons une limite axiale provoquée soit par l'entraînement du liquide vers le condenseur (limite d'entraînement) soit par le retour irrégulier du liquide à travers la structure capillaire vers l'évaporateur (limite capillaire).

C'est cette puissance axiale limite (\dot{Q}_{AL}) que nous avons mesurée, pour différents caloducs en cuivre fonctionnant dans la position verticale avec évaporateur en bas. Ces caloducs étaient munis d'une structure capillaire soit sur toute leur longueur, soit sur l'évaporateur seulement, soit même sans structure capillaire. Nous avons, par la suite, comparé les résultats expérimentaux ainsi trouvés avec les résultats théoriques proposés par différents auteurs, tout en essayant d'expliquer les divergences.

2. Aspect Théorique

2.1 La limite capillaire

Cette première limite, notée \dot{Q}_c , apparaît dès que la somme des différentes chutes de pression dans la phase vapeur $|\Delta p_v|$, dans la phase liquide $|\Delta p_l|$ et sous l'effet de gravité $|\Delta p_g|$ devient égale ou supérieure à la pression motrice capillaire maximale $|\Delta p_c|_{max}$. Le retour du liquide ne s'effectue plus régulièrement, d'où un assèchement local de la structure capillaire (cause première) lequel est à l'origine d'un assèchement de la zone d'évaporation (conséquence).

Le calcul de ces quatre termes de pression s'effectue individuellement dans le cadre des hypothèses suivantes, lesquelles sont universellement adoptées, à savoir :

- la structure capillaire est parfaitement saturée de liquide, lequel s'écoule uniquement dans son intérieur;
- la vapeur est supposée incompressible;
- les interactions entre les écoulements de vapeur et de liquide sont négligeables;
- la densité de flux radial est constante le long des zones d'évaporation et de condensation.

En remplaçant ainsi chacune des chutes de pression [2] par sa valeur en fonction de \dot{Q}_c on obtient l'équation qui nous détermine \dot{Q}_c en fonction des caractéristiques géométriques du caloduc, soit :

$$\frac{2k \dot{Q}_c^2}{\pi^2 r_v^4 \mathcal{L}^2 \rho_v} + \frac{4 \ell_{ef} \nu \ell}{\pi c \epsilon r_h^2 (r_i^2 - r_v^2) \mathcal{L}} - \rho_\ell g \ell = \frac{2 \gamma}{r_h}$$

où ρ_ℓ est la masse volumique du liquide à la saturation, ρ_v , la masse volumique de la vapeur à la saturation, ν , la viscosité cinématique du liquide, γ , la tension superficielle du liquide, \mathcal{L} , la chaleur latente de vaporisation du liquide, ℓ , la longueur du tube constituant le caloduc, ℓ_{ef} , la longueur effective du caloduc, r_h , le rayon hydraulique, r_v , le rayon du conduit de vapeur, r_i , le rayon interne du tube constituant le caloduc, ϵ , la porosité de la structure capillaire, k , la perméabilité de la structure capillaire, c , la constante correctrice de Kozeny, g , l'accélération de la pesanteur.

Les six premières grandeurs dépendent naturellement de la température T.

2.2 La limite d'entraînement.

Une seconde limite se manifeste lorsque la force de viscosité exercée par le flux de vapeur sur le film liquide qu'il cotoie est précisément égale à la force due à la tension superficielle⁽¹⁾: le liquide a alors tendance à être entraîné par la vapeur vers le condenseur, les forces capillaires ou de gravité n'assurant plus un retour suffisant du liquide à l'évaporateur; il s'ensuit des phénomènes d'assèchement analogues à ceux entraînés par la limite capillaire.

Cette nouvelle limite notée \dot{Q}_E , qui dépend essentiellement de l'interface liquide-vapeur (lui-même caractérisé au moyen d'un nombre δ ayant les dimensions d'une longueur et représentatif des dimensions et de la nature de l'interface) est donnée par

$$\dot{Q}_E = \pi r_v^2 \left[\frac{2\pi}{\delta} \rho_v \gamma \right]^{1/2} \mathcal{L}$$

Elle se manifeste plus tôt dans le cas de grosses mailles (δ grand) et est prépondérante dans le cas d'un caloduc fonctionnant sans structure capillaire (thermosiphon) ou avec structure capillaire uniquement à l'évaporateur.

3. Aspect Expérimental

Les caractéristiques des caloducs sur lesquels ont porté les différents essais sont groupées sur le tableau I : les dimensions géométriques externes

(1) La gravité est considérée ici comme négligeable au voisinage de l'interface liquide-vapeur.

Tableau I - Caractéristiques des caloducs expérimentés

caloduc n°	longueur (mm)	rayon ext. (mm)	rayon int. (mm)	rayon vapeur (mm)	nature du capillaire	nombre de mesh M du capillaire (nombre de fils par pouce)	nombre d'enroulements	volume du liquide (cm ³)
1	500	7,75	5,85	5,00	bronze	200	9	10,0
2	500	7,75	5,85	4,97	laiton	100	4	10,0
3	500	7,75	5,85	5,13	cuivre	60	2	8,4
4	500	7,75	5,85	5,36	bronze	40	1	6,1
5	500	7,75	5,85	5,85	bronze	40 capillaire sur 250mm à l'évap.	1	6,0
6	500	7,75	5,85	5,85	acier inox.	100 200 capillaire sur 250mm à l'évap.	1 2	5,6
7	500	7,75	5,85	5,85	sans structure capillaire	-	-	8,0

Nature des différents tubes : cuivre.

étaient les mêmes, ainsi que la longueur de la zone de condensation; celle-ci a toujours été prise égale à 200 mm, pour qu'elle s'adapte à un type unique de condenseur à circulation d'eau permettant, à partir du débit et de l'écart entre les températures d'entrée et de sortie de l'eau, le calcul de la puissance transférée. En revanche, la longueur de la zone d'évaporation, quoique généralement prise aussi égale à 200 mm pouvait, dans les essais portant sur les limitations radiales, être modifiée par déplacement du caloduc dans la partie centrale d'un petit four métallique. Quant aux caractéristiques internes, elles ont été prises aussi voisines que possible de celles déterminées par le calcul d'optimisation de \dot{Q}_c [6].

Cela posé, les deux paramètres susceptibles de varier d'une façon continue étaient d'une part le débit d'eau de refroidissement du condenseur et, d'autre part, la puissance calorifique injectée.

En maintenant fixe l'un des deux paramètres précédents (le débit par exemple) et en faisant croître l'autre par palier et en recherchant chaque fois l'établissement du régime stationnaire, on met en évidence, au voisinage d'un certain palier, l'apparition de l'un ou de l'autre des phénomènes suivants :

- chute extrêmement brutale de la puissance récupérée au condenseur, laquelle

est accompagnée d'une chute tout aussi brutale de la température de fonctionnement et suivie d'une élévation de la température de la zone d'évaporation du caloduc;

- chute progressive (sur 5 à 10 secondes) de la puissance récupérée au condenseur, laquelle est accompagnée d'une élévation de la température de fonctionnement et d'une élévation plus rapide de la température de la zone d'évaporation. La poursuite de l'essai montre une nouvelle augmentation de la puissance récupérée, laquelle ne retrouve cependant pas le niveau initial, alors que la température de fonctionnement continue d'augmenter et ce, jusqu'à l'établissement d'un nouveau régime de marche.

L'un et l'autre de ces phénomènes limitatifs ont leur origine dans un assèchement local de la structure capillaire :

- le premier dans un assèchement local hors de la zone d'évaporation. Cet assèchement (cause première) peut avoir son origine dans une limitation axiale soit capillaire, soit d'entraînement ;

- le second, dans une surchauffe suivie d'un assèchement dans la zone d'évaporation (cause première). Il s'agit alors d'une limitation radiale : le caloduc continue à fonctionner selon un nouveau régime correspondant à un assèchement partiel de la zone d'évaporation initiale.

Nous avons vérifié d'abord que c'est pour le fonctionnement vertical avec la pesanteur que la puissance axiale véhiculée par le caloduc atteint les valeurs les plus élevées quand on maintient constantes les longueurs de l'évaporateur et du condenseur, la puissance de chauffage, le débit d'eau de refroidissement et que l'on fait varier uniquement l'inclinaison.

C'est pour le caloduc n°4 avec un seul écoulement (cf tableau) et la plus grosse maille que nous avons véhiculé verticalement les plus grandes valeurs de la puissance axiale limite (Fig.1). Le même essai avec le même dernier maillage sur le caloduc n°5 dont la longueur de structure capillaire est dans la zone d'évaporation, réduite à 250 mm, conduit à des performances inférieures à celles du caloduc n°4 muni d'une structure capillaire sur toute sa longueur. Ce résultat est voisin de celui obtenu avec le caloduc n°6 avec une structure capillaire complexe en inox dans la seule zone d'évaporation et, chose plus surprenante, voisin également de celui obtenu sur le caloduc n°7 sans structure capillaire, ce qui tend à prouver que le phénomène de limitation observé, indépendant de la structure capillaire, ne serait autre qu'une limitation d'entraînement, le fonctionnement du caloduc ne pouvant s'expliquer qu'en supposant le liquide réparti sur la totalité des parois internes et non accumulé au fond de la zone d'évaporation.

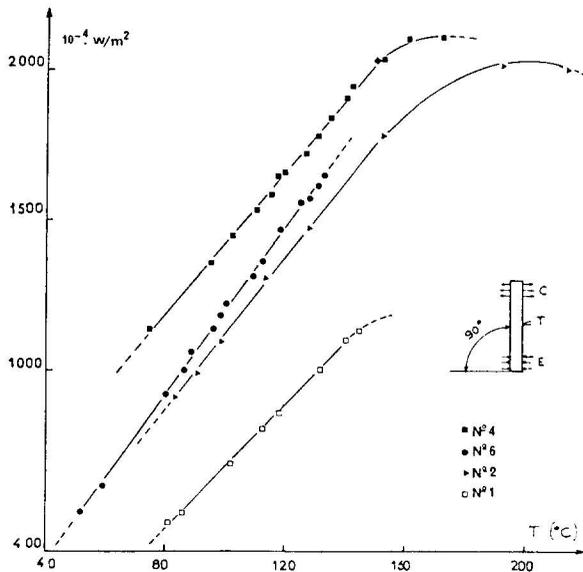


FIG. 1
Valeurs expérimentales de Q_{AL} pour divers caloducs

4. Interprétation des Résultats

Dès lors qu'il s'agit de caloducs munis d'une structure capillaire sur toute leur longueur, la puissance limite capillaire est donnée par l'expression trouvée pour \dot{Q}_c au § 2.1 laquelle, rappelons-le, a été établie dans l'hypothèse d'un écoulement du liquide qui n'affectait en rien celui de la vapeur. Cette hypothèse ne constitue évidemment qu'une approche, puisque puissances calculée et mesurée ne correspondent pas exactement (Fig.2): la théorie prévoit que c'est pour le caloduc possédant la structure la plus grossière que la limite capillaire est la plus élevée, ce qui est vérifié qualitativement, encore que l'écart entre résultats théoriques et expérimentaux soit plus important dans ce cas que dans celui d'une structure finement maillée. A priori, ceci semble normal, la séparation des écoulements liquides et gazeux étant alors plus marquée.

En outre, dans le cas de caloducs sans structure capillaire, ou avec structure capillaire au seul évaporateur, la considération de la seule limite d'entraînement, jointe à l'allure des courbes expérimentales de la figure 3, suggère l'application de la formule relatée au § 2.2 et donnant \dot{Q}_E avec la

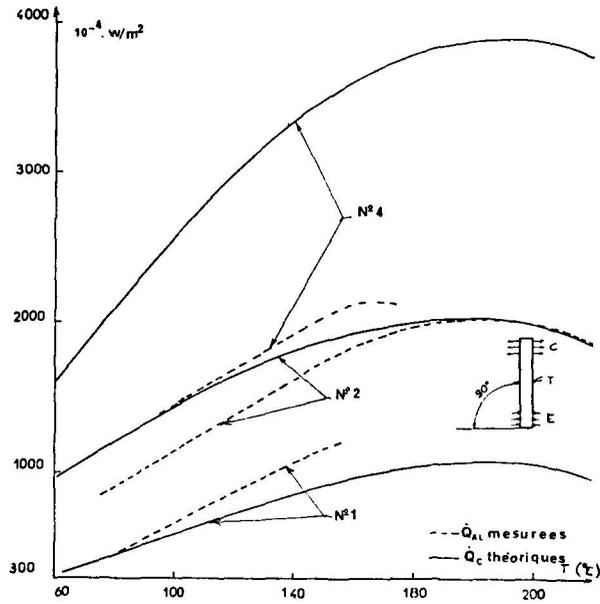


FIG. 2

Comparaison entre les valeurs expérimentales Q_{AL} et théoriques de Q_C pour les caloducs n° 1, 2, 4

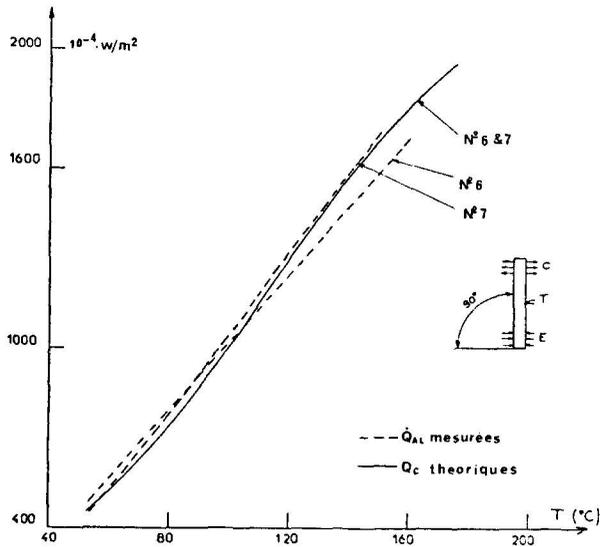


FIG. 3

Comparaison entre les valeurs expérimentales Q_{AL} et théoriques de Q_C pour les caloducs n°6 et 7

valeur 11 mm pour δ , valeur choisie pour assurer la meilleure superposition des courbes théoriques et expérimentales, l'une et l'autre étant quasi linéaires.

5. Conclusion

L'étude expérimentale des limitations d'un caloduc est délicate : la principale difficulté provient en fait de ce que l'on est, en Thermocinétique tout au moins, habitué à raisonner sur des systèmes passifs, alors qu'un caloduc est précisément le contraire : on peut le faire travailler dans des conditions surprenantes, mais il est aussi susceptible de cesser brusquement de fonctionner. Le transfert d'énergie étant alors interrompu, on doit le plus souvent éviter sa destruction en réduisant, voire en supprimant, le chauffage de la zone d'évaporation. Il reste qu'il serait du plus grand intérêt d'étudier les conditions dans lesquelles le fonctionnement reprendrait. Par ailleurs, les instabilités de régime qui précèdent souvent les arrêts de fonctionnement rendent parfois difficile la distinction du type de limitation rencontré.

Toutefois, si une telle étude est fondamentale pour bien connaître le fonctionnement du caloduc seul, elle ne saurait être séparée de celle portant sur le système thermique dans son ensemble, dans lequel est précisément inclus le caloduc; ce dernier est alors appelé à fonctionner dans des conditions normales, distinctes des conditions limites précédentes; c'est surtout sur ce dernier aspect du problème que l'utilisateur doit maintenant se pencher.

Références

1. T.P. Cotter, Theory of Heat Pipes, Los Alamos Sc. Lab. LA-3246 (1965).
2. C.A. Busse, Pressure Drop in the Vapor Phase of long heat Pipe, IEEE, Thermoionic conversion Specialist, Palo Alto, p.391 (1967), and Int. Heat and Mass Transfer, 16, 169 (1973).
3. J.E. Kemme, Heat Pipe Design considerations, Los Alamos Sc. Lab. LA-4221 MS (1969).
4. P. Vinz, C.A. Busse, Axial Heat Transfer Limite of Cylindrical Sodium Heat Pipes between 25 W/cm^2 and $15,5 \text{ kW/cm}^2$, Proc. 1st Int. Heat Pipe Conference Stuttgart (1973).
5. M. Groll, H. Brost, K.P. Shubert and P. Zimmermann, Heat Transfer Limits, Lifetests and Dynamics Behavior of Heat Pipes, Int. Symposium on Two Phase Systems, Stuttgart (1971).
6. A. Mojtabi, Contribution à l'étude des caloducs à eau, Thèse de Docteur-Ingénieur, Université de Poitiers (1976) (U.E.R ENSMA n°91).