
Soumis le: 05/05/2020

Forme révisée acceptée le: 02/06/2020

Correspondant: s.dahamni@univ-chlef.dz



Revue
Nature et Technologie

<http://www.univ-chlef.dz/revuenatec>

ISSN : 1112-9778 – EISSN : 2437-0312

Effets de la nature du fluide de travail et de la structure capillaire sur la capacité thermique d'un caloduc

Salim DAHAMNI¹, Hayet GUETARNI¹, Abdallah BENAROUS^{1,2}

¹Laboratoire LCEMSM, Université Hassiba Benbouali de Chlef, Département de Génie mécanique, Hay Essalem, Chlef, 02000, Algérie.

²Université Saâd Dahlab de Blida1, Département de Génie mécanique, Route de Soumâa, Blida, 09000, Algérie.

Résumé

Les caloducs trouvent leurs applications dans plusieurs domaines de l'ingénierie thermique, allant des composants électroniques jusqu'aux échangeurs des propulseurs d'engins spatiaux. Bien qu'ils puissent transférer de grosses quantités de chaleur sur un court intervalle, ils possèdent des limites d'exploitation. Les propriétés du fluide de travail, la structure capillaire, l'orientation du tube, la longueur et le diamètre du tube, en sont des paramètres qui affectent ces limites. La présente étude vise à évaluer numériquement la capacité du transfert thermique d'un caloduc, par élaboration d'un modèle unidimensionnel. L'eau, l'ammoniac et le sodium sont utilisés comme fluides de travail, associés à une structure capillaire de type mèches tissées ou de type rainures carrées et étudiés pour différentes gammes de température de fonctionnement. Des routines développées en Matlab[®], utilisées pour tester des configurations typiques pour lesquelles une analyse comparative, est conduite.

Mots-clés : Refroidissement des composants électroniques ; Caloduc ; Limites de transfert de chaleur ; Fluide de travail ; Structure capillaire.

Effects of the Working Fluid Nature and the Capillary Structure on the Thermal Capacity of a Heat Pipe

Abstract

Heat pipes have applications in several areas of thermal engineering, including electronic components to spacecraft thrust chamber exchangers. Although they can transfer large amounts of heat over a spatially restricted interval, they exhibit several operating limitations. The properties of the working fluid, the capillary structure, the orientation of the pipe, the length and the diameter of the pipe, are parameters that affect these limits. The present study aims to numerically evaluate the heat transfer capacity of a heat pipe. A one-dimensional model is developed considering water, ammonia and sodium as working fluids. The capillary structure is taken to be a wire mesh wick or a square groove, for which several operating thermal ranges are investigated. A comparative study for different properties of heat pipes has been performed using the Matlab[®] software.

Keywords: Electronics cooling; Heat pipe; Heat transfer limit; Working fluid; Capillary structure.

1. Introduction

Les caloducs traduisent la méthode passive la plus effective de transférer de grande quantité de chaleur, sous de faibles gradients de températures. Leur principe de fonctionnement repose d'une part, sur le déplacement des fluides par capillarité et d'autre part, sur le transfert d'énergie calorifique par vaporisation puis condensation d'un fluide entre deux températures. Le fluide de travail dans le caloduc est chauffé par la source de chaleur

externe, puis s'évapore et transporte la chaleur de la source de chauffage à la source froide, entraînée par le gradient de pression. Une fois que la vapeur atteint la source froide et se condense en liquide, le fluide de travail entre dans la structure de la mèche et retourne dans la section de chauffage, achevant ainsi tout un cycle de transfert de chaleur [1]. Les caloducs disposent d'une durée de vie assez élevée, à condition qu'une compatibilité entre le fluide de travail et le matériau de la paroi ainsi que celui de la structure capillaire, soit



Ceci est un document en libre accès selon les termes de [Creative Commons Attribution License CC-BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), ce qui permet de le partager, copier, reproduire, distribuer, communiquer, réutiliser ou de l'adapter avec l'obligation de créditer son auteur.

assurée. La sélection du fluide de travail détermine les performances thermiques du caloduc. Pour la plage de températures de fonctionnement souhaitée, plusieurs fluides de travail potentiels peuvent exister, de sorte que d'autres facteurs doivent être pris en considération afin de choisir le fluide le plus acceptable pour l'application donnée. Des paramètres tels que les capacités de transfert de chaleur, la stabilité thermique, la mouillabilité, la pression de vapeur optimale, la chaleur latente élevée et la compatibilité du fluide avec l'enveloppe et la matière de la couche capillaire du caloduc jouent un rôle important dans la détermination du fluide de travail approprié. Le dernier facteur doit être soigneusement pris en compte car la non-compatibilité des matériaux peut décomposer le fluide de travail, entraînant la corrosion et des réactions chimiques des gaz incondensables provoquant la défaillance du caloduc. La mise en œuvre de caloducs est bénéfique pour de nombreuses industries, et ils peuvent être appliqués à une gamme de températures de fonctionnement allant de la cryogénie aux hautes températures [2]. En outre, les sélections se concentrent sur certaines des applications industrielles les plus répandues, telles que le solaire [3], les nanoparticules, les cycles de Rankine, le nucléaire, les modules thermoélectriques et la céramique, dans lesquels les technologies de caloducs offrent de nombreux avantages clés par rapport aux pratiques conventionnelles.

Le nouvel essor des études sur les caloducs date des premiers programmes spatiaux. Ainsi en 1963, au laboratoire de Los Alamos (Nouveau Mexique – USA), Grover dépose un brevet d'application du premier caloduc haute température utilisant le sodium comme fluide caloporteur [4]. C'est dans ce cadre aussi que de nombreux prototypes (caloduc à eau ou à sodium liquide) sont fabriqués et testés. En 1965, Cotter publie, dans un rapport du même laboratoire, les premiers travaux théoriques et développe les premiers outils d'aide au dimensionnement [4]. En France, de nombreux travaux ont également été réalisés notamment sous l'impulsion de Martinet à partir de la fin des années 60. A partir des années 80, un foisonnement de réalisations font exploser les domaines de recherche portant sur les caloducs (micro caloducs, boucles diphasiques, caloducs à pompage capillaire, caloducs pulsés, ...) [5].

Récemment, des études ont montré qu'un capteur solaire intégrant un caloduc à entraînement capillaire conduit à des performances plus élevées avec une

efficacité qui atteint 84 % comme suggéré dans [6]. Tous ces articles montrent qu'avec des fluides auto-rétractables, le transfert de chaleur à ébullition peut être amélioré, offrant de meilleures performances en raison du comportement différent d'émission de bulles, tout en entraînant une amélioration du transfert de chaleur [7].

Les performances d'un caloduc cylindrique dans diverses conditions de fonctionnement ont été analysées expérimentalement. Des études expérimentales ont été menées pour étudier les effets de différents paramètres sur la performance thermique des caloducs [8]. Ces études peuvent être classées en différents groupes : étudier les conditions de fonctionnement du caloduc, étudier le type de structure de la couche capillaire, les effets du type de fluide de travail ou la géométrie du caloduc [9]. La quantité de fluide de travail à capsuler dans le caloduc reste à calculer aussi [10]. Un récit a été publié par la NASA en 1999 sur les caloducs en aluminium à charge d'ammoniac, avec une structure capillaire extrudée, où il a été souligné que la pureté du fluide utilisé dans le caloduc devait être d'au moins 99,99 % et que toute trace d'eau dans l'ammoniac pourrait entraîner la formation d'hydrogène gazeux [11]. Les caloducs en aluminium ont joué un rôle vital dans la gestion thermique des satellites et des astro-véhicules [12] possédant une faible densité et une conductivité thermique élevée des alliages d'Aluminium. Ils utilisent généralement des micro-rainures comme passages de fluide de travail [13]. Certains auteurs ont déjà mené des études expérimentales [14-16] et numériques [17-18] en faisant varier les paramètres du caloduc tels que le flux de chaleur, le fluide de travail, la pression et la température de fonctionnement, le taux de remplissage du fluide et l'angle d'inclinaison.

Les effets de différents fluides de travail sur les performances d'un caloduc à double diamètre ont été étudiés par Peyghambarzadeh *et al.* [19]. Ces auteurs ont utilisé l'eau, le méthanol et l'éthanol comme fluides de travail et ont indiqué que des coefficients de transfert de chaleur plus élevés ont été obtenus pour l'eau et l'éthanol par rapport au méthanol. De nombreuses revues ont été énumérées fournissant une généralisation des technologies dans un domaine spécifique avec l'identification des conditions de fonctionnement optimales et des limitations potentielles. Bien que les conditions de fonctionnement et les limitations aient été identifiées, la même technologie n'a pas été testée et appliquée dans une application industrielle, ou

probablement par manque de validation. Chan *et al.* [20], ont étudié les différents types de couches capillaires aux côtés de différents types de caloducs. Kempers *et al.* [21] ont étudié expérimentalement l'effet du nombre de couches de la mèche tissée et de la charge de fluide sur les caloducs à mèche tissée. Ils ont constaté que le transfert de chaleur maximal augmente avec l'augmentation du nombre de mailles. Les caractéristiques du transfert de chaleur dans un caloduc ont été prédites par A. K. Mozumder *et al.* en 2011 [22]. Le caloduc a été testé avec et sans fluide de travail ; considérant également, si le changement de phase survenait ou non. Il a été constaté que la température de fonctionnement du caloduc régissait la vaporisation du fluide de travail. Le caloduc semblait fonctionner efficacement uniquement lors de la présence d'un changement de phase. Les trois fluides de travail ; eau, méthanol et acétone ont été évalués à l'égard de leurs limites de fonctionnement dans les travaux de Wallin [5]. Il a été démontré que l'eau est le meilleur fluide de travail pour la plupart des limites, plus spécifiquement la limite capillaire qui représente une mesure de performance.

La gestion thermique est indispensable dans de nombreux domaines de la société moderne, tels que l'utilisation du nucléaire, la collecte d'énergie solaire et le refroidissement en électronique. C'est pourquoi un programme de calcul sous Matlab® a été élaboré. L'intérêt de ce dernier consiste à générer des données calculées en vue d'une optimisation des systèmes thermiques passifs. Pour atteindre notre objectif, nous avons opté pour étudier les effets de trois fluides différents ; l'eau, l'ammoniac et le sodium. Deux types de structures capillaires couramment utilisées sont choisies pour démontrer l'effet de la structure capillaire sur la capacité de transfert de chaleur du caloduc. Ce sont la structure à mèche tissée et la structure à rainures longitudinales (axiales).

2. Principe de fonctionnement

La conception d'un caloduc standard est illustrée par la figure 1. Le liquide est évaporé à l'extrémité chaude, transféré vers l'extrémité froide puis de nouveau condensé pour passer à l'état liquide. Le transfert vers l'extrémité chaude est effectué via une force capillaire avec des contributions positives / négatives de la gravité.

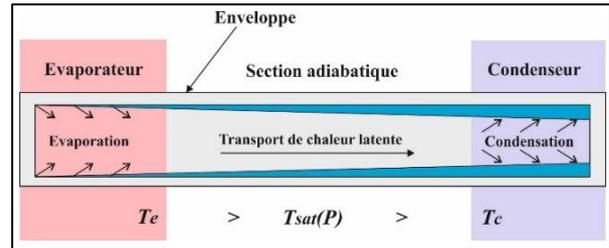


Figure 1. Schéma de principe de fonctionnement d'un caloduc.

Le type de la structure capillaire utilisée dans un caloduc détermine l'intensité de la force capillaire générée et la perméabilité du passage du liquide. Les structures capillaires les plus répandues sont les réseaux capillaires poreux (frittées), à rainures et à tissus métalliques (Figure 2).

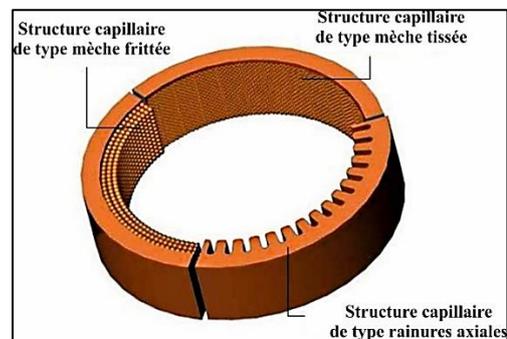


Figure 2. Différents types de structures capillaires.

Le caloduc possède une plage de fonctionnement bien précise, définie par des valeurs limites du flux thermique, liées aux écoulements du liquide et de la vapeur, à la géométrie du caloduc, à la structure capillaire et aux propriétés thermophysiques du fluide de travail. Ces flux forment une courbe en forme de cloche et dépendent de la température de la vapeur au centre du caloduc (Figure 3).

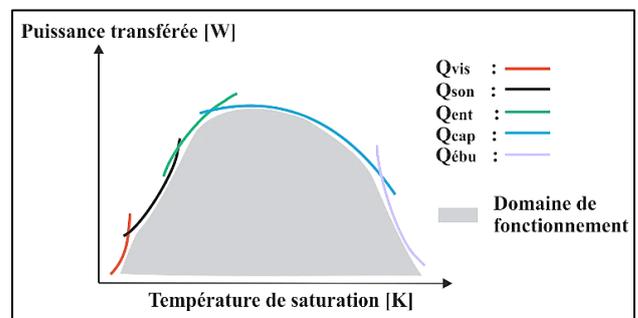


Figure 3. Domaine de fonctionnement pour un caloduc à pompage capillaire.

2.1. Le fluide de travail

Une restriction majeure dans la sélection du fluide de travail est la plage de température de fonctionnement. Des températures très basses peuvent empêcher la vaporisation du fluide, alors que de haute température

peut provoquer une dégradation thermique du fluide de travail. Comme pour la majorité des cas, la plage de fonctionnement pour le caloduc se situe entre 0 °C et 100 °C. Sur cette base, les fluides suivants ont été sélectionnés : Ammoniac, Eau distillée et le Sodium (Tableau 1).

Tableau 1

Propriétés thermo-physiques du fluide de travail [4]

Fluide de travail	Temp (K)	l_v (kJ/kg)	ρ_l (kg/m ³)	ρ_v (10 ⁻³ kg/m ³)	μ_l (10 ⁻⁴ Ns/m ²)	μ_v (Ns/m ²)	p_v (×10 ⁻³ Pa)	σ_l (×10 ⁻² N/m)	k_l (×10 ⁻¹ W/mK)
Eau	275	2 497	10 ³	5,50	16 520	8,09	0,70	07,53	5,74
	285	2 473	10 ³	10,06	12 250	8,49	1,39	07,43	5,90
	295	2 449	998,00	19,25	9 590	8,89	2,62	07,27	6,06
	305	2 426	995,00	33,62	7 690	9,29	4,71	07,09	6,20
	315	2 402	991,10	56,12	6 310	9,69	8,13	06,92	6,34
	325	2 378	987,20	90,42	5 280	10,09	13,51	06,75	6,45
	335	2 354	982,30	141,04	4 530	10,49	21,67	06,58	6,56
	345	2 329	976,60	213,54	3 890	10,89	33,72	06,41	6,68
	355	2 304	970,90	314,47	3 430	11,29	51,00	06,23	6,71
	365	2 278	963,40	452,08	3 060	11,69	75,14	06,05	6,77
	375	2 251	956,70	636,70	2 710	12,10	108,88	05,85	6,81
Ammoniac	200	1 473,90	728,12	90	5 073	6,95×10 ⁻²	8,70	06,04	8,03
	220	1 424,19	705,76	320	3 467	7,48×10 ⁻²	33,80	05,23	7,33
	240	1 369,00	681,75	900	2 549	8,06×10 ⁻²	102,20	04,47	6,65
	260	1 307,11	656,22	2 120	1 973	8,66×10 ⁻²	255,30	03,74	6,00
	280	1 237,31	629,08	4 380	1 581	9,27×10 ⁻²	550,90	03,06	5,39
	300	1 157,99	599,97	8 250	1 293	9,89×10 ⁻²	1 061,70	02,42	4,80
	320	1 066,30	568,19	14 510	1 069	10,56×10 ⁻²	1 872,80	01,83	4,25
	340	957,93	532,44	24 400	886	11,33×10 ⁻²	3 080,20	01,29	3,72
	360	824,77	490,26	40 190	728	12,35×10 ⁻²	4 792,90	00,80	3,19
	380	647,98	436,07	67 370	583	14,03×10 ⁻²	7 140,20	00,38	2,67
	400	381,43	355,04	120 961	391	17,61×10 ⁻²	10 286,00	00,04	2,11
Sodium	773	828,10	0,003	24×10 ⁻²	0,0018	828,1	1,00	15,10	700,80
	873	805,40	0,013	21×10 ⁻²	0,0019	805,4	4,00	14,20	646,20
	973	763,50	0,050	19×10 ⁻²	0,0020	763,5	15,00	13,30	608,10
	1073	757,30	0,134	18×10 ⁻²	0,0022	757,3	47,00	12,30	578,10
	1173	745,40	0,306	17×10 ⁻²	0,0023	745,4	125,00	11,30	533,50
	1273	725,40	0,667	16×10 ⁻²	0,0024	725,4	281,00	10,40	490,80
	1373	690,80	1,306	16×10 ⁻²	0,0025	690,8	549,00	9,50	450,80
	1473	669,00	2,303	15×10 ⁻²	0,0026	669,0	959,00	8,66	410,80
	1573	654,00	3,622	15×10 ⁻²	0,0027	654,0	1 591,00	7,70	370,80

La propriété suivante à considérer est le nombre de mérite qui représente une mesure de la capacité de transfert de chaleur du fluide de travail. L'eau dispose le plus grand nombre de mérite en raison de sa haute chaleur latente de vaporisation.

$$M = \frac{\rho_l \sigma_l l_v}{\mu_l} \quad (1)$$

avec ρ_l , σ_l , l_v et μ_l désignant respectivement, la densité, la tension superficielle, la chaleur latente de vaporisation et la viscosité dynamique du fluide. Wong et Lin [23] ont étudié trois fluides de travail différents, dont l'eau, le méthanol et l'acétone, qui possèdent différents nombres de mérite, au même taux de remplissage.

2.2. Matériaux de la structure de mèche

Pour ce qui est de la compatibilité entre le fluide et le matériau de l'enveloppe, il est possible de trouver des bases de données indiquant les combinaisons possibles entre corps [4]. La structure du réseau capillaire et le fluide de travail génèrent les forces capillaires nécessaires pour pomper le liquide du condenseur vers l'évaporateur et maintenir la répartition du liquide uniforme dans le matériau de la structure capillaire. Le cuivre, l'aluminium et l'acier sont les matériaux les plus courants utilisés dans les caloducs (Tableau 2).

Tableau 2
Compatibilité entre les fluides et les matériaux les plus fréquents [4]

Matériaux	Fluide compatible
Cuivre	Eau, acétone, méthanol
Aluminium	Ammoniac, acétone
Acier	Sodium

Le cuivre possède une conductivité thermique très élevée, mais il a également une forte masse volumique. L'aluminium, d'autre part, est moins cher et dispose d'une masse volumique plus faible. Mais l'eau n'est pas compatible avec l'aluminium car l'hydrogène gazeux formé pendant le fonctionnement, bloque le volume de la section du condenseur. Par conséquent, l'acétone est adéquate avec l'Aluminium.

3. Modélisation

Plusieurs auteurs et chercheurs (Faghri [10]; Dunn and Reay [24]; Peterson [25]) ont proposé des formules et des équations pour calculer la quantité de fluide, le flux

thermique maximum transféré à certaines limites de fonctionnement (Visqueuse, capillaire, sonique, ébullition, entraînement, etc...) en fonction du fluide de travail, de la structure capillaire, des dimensions du caloduc et de la température de fonctionnement :

3.1. La limite visqueuse

Elle se produit à des températures de fonctionnement faibles, où la pression de vapeur de saturation peut être du même ordre de grandeur que la chute de pression requise pour entraîner le flux de vapeur dans le caloduc. Il en résulte une pression insuffisante disponible pour conduire la vapeur :

$$Q_{vis} = \frac{A_v \rho_v l_v r_v^2 P_v}{16 \mu_v L_{eff}} \quad (2)$$

3.2. La limite sonique

Une autre limite apparaît, elle aussi, lorsque la pression interne du caloduc est très faible. En effet, comme la masse volumique de la vapeur est faible, un fort flux de chaleur à transférer implique une grande vitesse de déplacement de ses molécules. Lorsque celle-ci devient trop importante, elle peut atteindre la vitesse du son, ce qui a pour effet de créer une onde de choc dans le caloduc qui perturbe son fonctionnement :

$$Q_{son} = A_v \rho_v l_v \left[\frac{\gamma_v R_v T_v}{2(\gamma_v + 1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

3.3. La limite d'entraînement

Elle se réfère au cas des forces de cisaillement élevées développées par le passage de la vapeur dans le sens de contre-courant du liquide saturé dans la structure capillaire. Ce cisaillement se traduit par l'apparition de vaguelettes qui s'ondulent au fur et à mesure que la vitesse augmente, conduisant à l'arrachement de gouttelettes liquides. Ces gouttelettes peuvent être entraînées par la vapeur et renvoyées dans le condenseur. Il en résulte un écoulement de liquide insuffisant dans la structure capillaire :

$$Q_{ent} = A_v l_v \left[\frac{\sigma \rho_v}{2r_h} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

3.4. La limite capillaire

Quant à la limite capillaire, elle est liée au phénomène fondamental qui régit le fonctionnement d'un caloduc et qui consiste à développer des différences de pression capillaires dans les interfaces liquide-vapeur dans l'évaporateur et le condenseur. Lorsque la pression capillaire du caloduc est insuffisante pour fournir un flux de liquide adéquat du condenseur à l'évaporateur, l'assèchement de la structure au niveau de l'évaporateur est probable :

$$Q_{cap} \leq \frac{\frac{2\sigma}{r_{ce}} - \rho_l \cdot g (d_v \cdot \cos(\psi) + L_{eff} \cdot \sin(\psi))}{\left(\frac{C \cdot f_v \cdot Re_v \cdot \mu_v}{2 \cdot r_{hv}^2 \cdot A_v \cdot \rho_v \cdot l_v} + \frac{\mu_l}{K \cdot A_w \cdot l_v \cdot \rho_l} \right) \cdot L_{eff}} \quad (5)$$

3.5. La limite d'ébullition

Celle-ci peut être atteinte quand, sous l'effet de flux trop élevé, la surchauffe de la paroi devient trop importante et qu'il y a apparition de bulles dans la phase liquide. Ces bulles altèrent le retour du liquide du condenseur vers l'évaporateur. Ceci peut alors induire un assèchement local de l'évaporateur avec apparition de points chauds qui peuvent mener jusqu'à la destruction du tube par fusion locale :

$$Q_{cap} = \left(\frac{2\pi L_e k_{eff} T_v}{l_v \rho_v \ln(r_i/r_v)} \right) \cdot \left(\frac{2\sigma}{r_n} - \Delta P_c \right) \quad (6)$$

Le minimum des limites de flux de chaleur mentionnées ci-dessus est considéré comme la quantité maximale autorisée de chaleur (Q_{max}) qu'un caloduc peut transférer.

$$Q_{max} = \min(Q_{vis}, Q_{son}, Q_{ent}, Q_{cap}, Q_{ébu})$$

Les modèles de caloducs sont assez complexes et dépendent de nombreuses hypothèses simplificatrices, propriétés et variables. Une expression du flux maximal peut être obtenue si l'on suppose que :

- Une symétrie rotationnelle de l'écoulement, température de vapeur constante dans l'espace de vapeur et conditions d'état stable,
- Les propriétés du liquide sont homogènes le long du caloduc,
- La structure capillaire est uniforme le long du caloduc,
- La chute de pression due au débit de vapeur peut être négligée.

3.5. Présentation de l'interface du programme

Comme l'illustre la figure 4, nous avons opté pour le développement d'une interface simple et conviviale où les équations du modèle sont implémentées. L'interface se présente sous forme de fenêtres, icônes et menus. L'utilisateur d'un tel système d'interaction pourra introduire les paramètres correspondant à la conception du dispositif choisi, comme le choix du type de la structure capillaire du caloduc cylindrique et le type du fluide de travail, afin de pouvoir contrôler le système par des sorties (résultats) sous forme de tableaux et des courbes (Figure 5).



Figure 4. Interface graphique du modèle élaboré pour le caloduc.

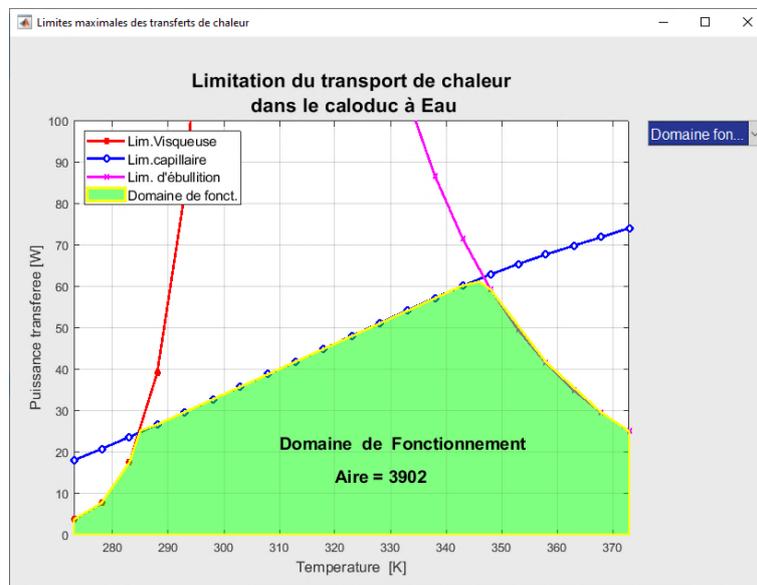


Figure 5. Interface graphique représentant le domaine de fonctionnement d'un caloduc à eau

Du point de vue technique, cette interface est un ensemble de fonctions et procédures ; elle a été développée de manière interactive afin d'aider l'utilisateur à une compréhension meilleure par l'utilisation de ses résultats.

4. Résultats et discussions

Les caloducs de types eau-cuivre, ammoniac-aluminium et sodium-acier sont utilisés dans la présente étude. Dans cette première partie, les résultats des analyses pour la structure capillaire de type mèche tissée

sont présentés. Les caloducs utilisés dans les analyses ont les mêmes propriétés, à l'exception du fluide de travail et le matériau de la structure capillaire. L'échelle de température est variable pour les différents fluides de travail, étant donné que les plages de fonctionnement des fluides de travail sont différentes. La plage de fonctionnement du fluide de travail est comprise entre sa température de fusion et la température critique. Il est évident que le point de fusion est la plus basse température, et le point d'ébullition est sélectionné comme le point maximal, puisque la pression de saturation est égale à la pression atmosphérique.

Les propriétés de la configuration du caloduc qui sont utilisées pour la première analyse sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 - Configuration de base du caloduc étudié

Diamètre extérieur de l'enveloppe (m)	0,020
Longueur totale du caloduc (m)	0,75
Longueur de l'évaporateur (m)	0,25
Longueur de la section adiabatique (m)	0,25
Longueur du condenseur (m)	0,25
Epaisseur de l'enveloppe (m)	0,0025
Matériaux de l'enveloppe-fluides de travail	Cuivre-Eau ; Acier-Sodium ; Aluminium-Ammoniac
Orientation du caloduc	Horizontale
Structure capillaire	Mèches tissées
Nombre de mailles/pouce	100
Diamètre du fil (m)	$1,143 \times 10^{-4}$
Nombre de couches	3

Les résultats de la première analyse où l'eau est choisie comme fluide de travail, peuvent être aperçus sur la figure 6 (échelle semi-logarithmique).

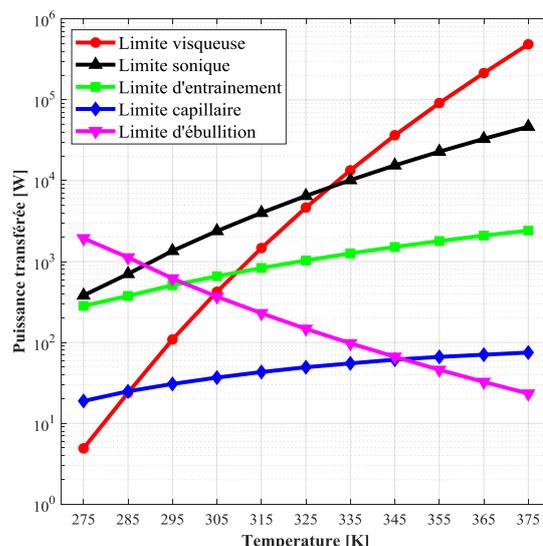


Figure 6. Résultats de calcul effectué pour l'eau comme fluide de travail.

Avec cette configuration, on aperçoit que la limite dominante qui détermine la capacité de transport de chaleur du caloduc est la limite capillaire. La valeur de transfert de chaleur pour la limite capillaire est presque toujours inférieure à celle des valeurs de transfert de chaleur des autres limites, à l'exception de la limite visqueuse et celle de l'ébullition. Pour des températures plus basses, en particulier allant jusqu'à 275 K (4,90 W), les valeurs de transfert de chaleur de la limite visqueuse sont inférieures à celles de la limite capillaire. Par contre, pour des températures hautes, allant jusqu'à 375 K (23,36 W), les valeurs de transfert de chaleur de la limite d'ébullition sont inférieures à celles de la limite capillaire. Une puissance maximale de transfert est calculée, égale à 61,56 W (345 K).

Les comportements des limites pour l'ammoniac sont globalement différents de ceux du caloduc à eau, (Figure 7). En augmentant la température, toutes les limites, sauf celle de l'ébullition, affichent une tendance croissante. La limite capillaire continue sa progression jusqu'à 240 K, puis affiche une tendance à la baisse après cette température. De même, on constate une augmentation de la limite d'entraînement jusqu'à 325 K, suivie d'une diminution pour des températures plus élevées. Différent de l'eau, la limite dominante est la limite d'ébullition pour l'ammoniac, sauf, pour des températures plus basses où c'est la limite capillaire qui subsiste. Ceci est dû aux pressions de vapeur élevées d'ammoniac. Une puissance

maximale de transfert est calculée, égale à 25,87 W (225 K).

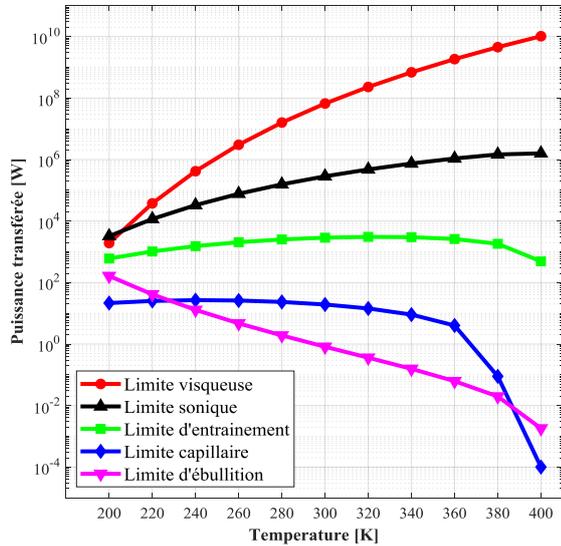


Figure 7. Résultats de calcul effectué pour l'ammoniac comme fluide de travail.

Les analyses finales sont effectuées pour le sodium. Comme on peut le voir sur la figure 8, le comportement du sodium est quasi-similaire aux autres fluides. La limite visqueuse, limite sonique et celle d'entraînement progressent à mesure que la température augmente. Par contre, l'augmentation de la température provoque une diminution de la limite d'ébullition. Cependant, comme pour l'ammoniac, la limite capillaire augmente pendant un certain temps, pour atteindre la valeur maximale qui est de l'ordre de 399,13 W (883 K), après cette température, elle commence à diminuer. La limite dominante est la limite visqueuse pour des températures inférieures à 840 K, et la limite capillaire devient dominante par la suite pour des températures de fonctionnement moyennement élevées.

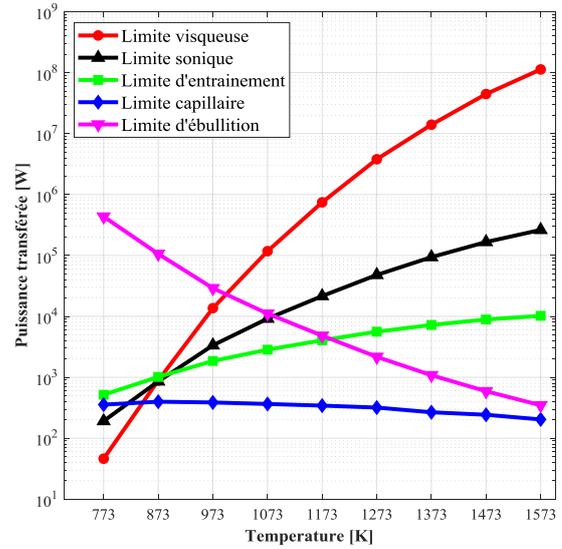


Figure 8. Résultats de calcul effectué pour le sodium comme fluide de travail.

Dans cette seconde partie, une structure de type rainure carrée est utilisée. La figure 9 illustre les performances du caloduc à eau ayant une configuration initiale sont représentées. On peut voir que le comportement du caloduc est similaire à celui de la configuration de type mèches tissées, sauf que dans ce cas, la limite capillaire est la limite dominante pour toute la plage de température, et elle s'avère la seule à déterminer la capacité maximale de transfert de chaleur du caloduc 6 W (375 K), avec une diminution de 90,25 % par rapport à celle du premier cas.

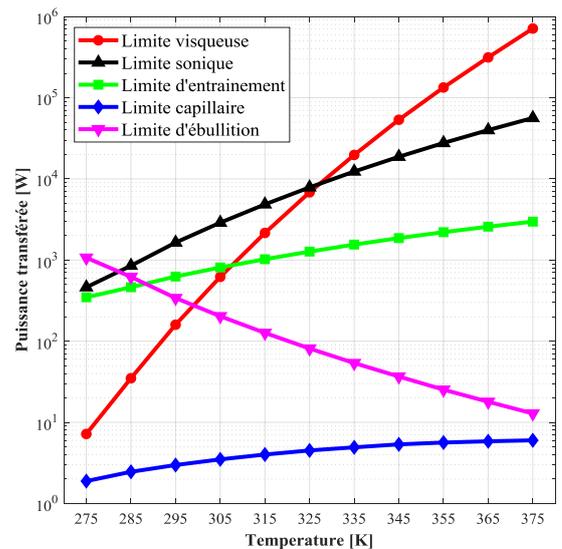


Figure 9. Résultats de calcul effectué pour 10 rainures carrées (0,0005×0,0005), (l'eau comme fluide de travail).

Pour l'ammoniac, les résultats de la configuration initiale sont visibles sur la figure 10. Les résultats montrent que la limite capillaire est la plus dominante pour le caloduc à ammoniac sauf dans l'intervalle [275 K à 296 K], exactement comme il a été reproduit pour le cas de la mèche tissée. En outre, les valeurs de toutes les limites, à l'exception de la limite d'ébullition, augmentent pour atteindre un pic à mesure que la température augmente. Une puissance maximale de transfert est enregistrée, égale à 2,48 W (220 K), avec une diminution de 90,41 % par rapport à celle du premier cas.

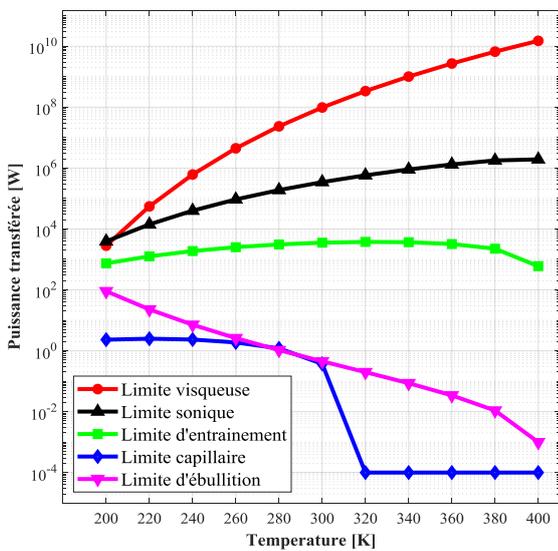


Figure 10. Résultats de calcul effectué pour 10 rainures carrées (0,0005×0,0005), (l'ammoniac comme fluide de travail).

Les performances du caloduc au sodium avec une structure capillaire de type rainure carrée sont représentées sur la figure 11. Comme nous l'avons vu pour le cas de l'eau, la limite capillaire est la limite dominante. Sauf que pour le sodium, la limite capillaire augmente pour atteindre un pic à la température 873 K (58,42 W), ensuite elle commence à diminuer jusqu'à une valeur minimale. Dans ce cas la puissance maximale a diminué de 85,36 %.

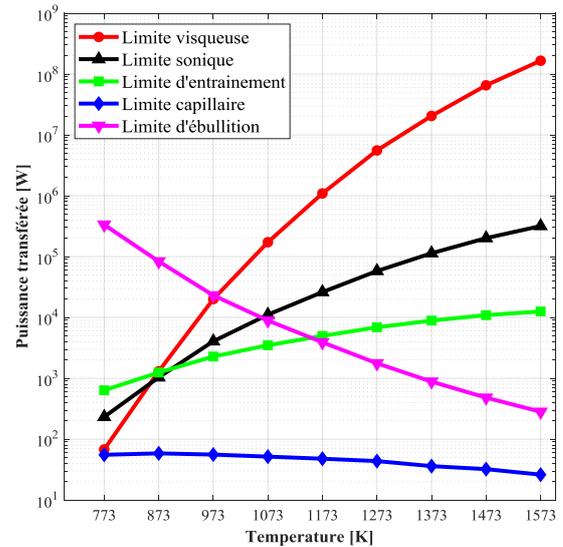


Figure 11. Résultats de calcul effectué pour 10 rainures carrées (0,0005×0,0005), (le sodium comme fluide de travail).

En plus de la diminution des puissances dans la seconde configuration nous avons enregistré une diminution des aires représentant le domaine de fonctionnement pour les différents fluides de travail. Les proportions de l'aire du domaine de fonctionnement de la structure rainure longitudinale par rapport à celle de la mèche tissée pour l'eau, l'ammoniac et le sodium sont respectivement : 10,9 %, 15 % et 13,9 %.

5. Conclusion

Un programme en Matlab® a été établi pour prédire les performances d'un caloduc. Une attention particulière a été octroyée à l'influence de la plage de température sur les performances de son système passif.

Pour notre cas, l'utilisation de la structure à mèches tissées a fourni des capacités maximales de transfert de chaleur pour les trois fluides de travail. L'eau a fourni la capacité maximale de transfert de chaleur pour la plage de température de 285 K à 375K. Par conséquent, l'eau est meilleure que l'ammoniac et le sodium pour des applications à température ambiante. L'ammoniac a présenté de meilleures performances pour des applications cryogéniques du caloduc, et le sodium a pu être utilisé pour des applications de caloduc à haute température.

Comme perspectives, cette interface graphique peut être améliorée en ajoutant des tableaux pour d'autres types de fluides de travail ainsi que d'autres modèles représentant les différents types de structures capillaires existants actuellement pour l'amélioration d'un caloduc.

References

- [1] Motahar S. and Khodabandeh R., Experimental study on the melting and solidification of a phase change material enhanced by heat pipe, *Int. Commun. Heat Mass Transfer*, 73 (2016): 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.02.012>
- [2] Jouhara H., Chauhan A. and Nannou T., Almahmoud S., Delpech B., Wrobel L.C., Heat pipe based systems - Advances and applications, *Energy*, 128 (2017): 729-754. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.04.028>
- [3] Khairnasov S.M. and Naumova A.M., Heat pipes application to solar energy systems, *Appl. Sol. Energy*, 52 (2016): 47–60. <https://doi.org/10.3103/S0003701X16010060>
- [4] Zohuri B., Heat Pipe Design and Technology: Modern Applications for Practical Thermal Management, 2nd ed., Springer International Publishing, Switzerland, (2016). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29841-2>
- [5] Wallin P. and Heat Pipe, selection of working fluid, Project Report, MVK160 Heat and Mass Transfer, Lund, Sweden, May 7, (2012). [Version électronique]. Disponible sur internet URL: http://www.ht.energy.lth.se/fileadmin/ht/Kurser/MVK160/2012/Per_Wallin.pdf (Consulté le 09/12/2019)
- [6] Jahanbakhsh A., Haghgou H. ad Alizadeh S., Experimental analysis of a heat pipe operated solar collector using water–ethanol solution as the working fluid, *Sol Energy*, 118 (2015): 267–275. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.04.023> (Original article). Corrigendum: *Sol. Energy*, 122 (2015) 1429. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.09.037>
- [7] Savino R. and D. De Cristofaro, A. Cecere, Flow visualization and analysis of self-rewetting fluids in a model heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 115 (2017): 581–591. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.07.090>
- [8] Mahdavi M., Tiari S., Schamphelre De S. and Qiuc S., Experimental study of the thermal characteristics of a heat pipe, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 93 (2018): 292–304. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2018.01.003>
- [9] Seo J., Bang I.C. and Lee J.Y., Length effect on entrainment limit of large-L/D vertical heat pipe, *Int. J. Heat Mass Transf.*, 97 (2016): 751–759. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.065>
- [10] Faghri A., Heat Pipe Science and Technology, Taylor & Francis, Washington, (1995), 874pp. ISBN : 1-56032-383-3
- [11] NASA, Ammonia-Charged Aluminium Heat Pipes with Extruded Wicks, (1999), <https://llis.nasa.gov/lesson/698> (Consulté le 05/04/2020)
- [12] Jing Zhang, Li-xian Lian, Ying Liu, Liquid phase enhanced sintering of porous aluminum for cylindrical Al-acetone heat pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152 (2020): 119-512. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119512>
- [13] Anand A.R., Analytical and experimental investigations on heat transport capability of axially grooved aluminium-methane heat pipe, *Int. J. Therm. Sci.* 139 (2019): 269–281. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.01.028>
- [14] Kumaresan G., Vijayakumar P., Ravikumar I M., Kamatchi R. and Selvakumar P., Experimental study on effect of wick structures on thermal performance enhancement of cylindrical heat pipes, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* (2019) 136:389–400. <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7842-2>
- [15] Motevasel M., Nazar ARS. and M. Jamialahmadi, Experimental study on turbulent convective heat transfer of water-based nanofluids containing alumina, copper oxides and silicon carbide nanoparticles. *J Therm Anal Calorim.* (2019). <https://doi.org/10.1007/s10973-018-7314-8>
- [16] Luo Y., Li Z.X., Yu Z.C. and X.D. Wang, Influence of Parallel and Trapezoidal Wick Structures to the Heat Transfer Capability of MHPs. *Applied Mechanics and Materials* 868 (2017): 33–38. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.868.33>
- [17] Chaudhari A. and M. Borkar, A. Deshpande, M. Tendolkar, V.K. Singh, Numerical Investigation of Cylindrical Heat Pipe Performance. In: Deb D., Balas V., Dey R. (eds) *Innovations in Infrastructure. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol 757. Springer, Singapore, (2018). https://doi.org/10.1007/978-981-13-1966-2_26
- [18] Wits W.W. and te G.J. Riele, Modelling and performance of heat pipes with long evaporator sections. *Heat Mass Transf.* 53, (2017): 3341–3351. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2040-5>
- [19] Peyghambarzadeh S.M., Shahpouri S., Aslanzadeh N. and Rahimnejad M., Thermal performance of different working fluids in a dual diameter circular heat pipe, *Ain Shams Eng. J.* 4 (2013): 855–861. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.03.001>
- [20] Chan C.W., Siqueiros E., Ling-Chin J., Royapoor M. and Roskilly A.P., Heat utilisation technologies: a critical review of heat pipes. *Renew Sustain Energy Rev* 50 (2015): 615-627. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.028>
- [21] Kempers R. and Ewing D., C. Ching, Effect of number of mesh layers and fluid loading on the performance of screen mesh wicked heat pipes, *Appl. Therm. Eng.*, 6 (2006): 589–595. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.07.004>
- [22] Mozumder, Chowdhury M.S.H., and Akon A.F., Characteristics of Heat Transfer for Heat Pipe and Its Correlation, *International Scholarly Research Notices*, Vol 2011, p. 1-7. <https://doi.org/10.5402/2011/825073>
- [23] Wong S.C., Lin Y.C. and Liou J.H., Visualization and evaporator resistance measurement in heat pipes charged with water, methanol or acetone, *Int. J. Therm. Sci.*, 52 (2012): 154–60. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2011.09.020>
- [24] Reay D. and Kew P., Heat Pipes Theory, Design and Applications, fifth ed UK, Butterworth-Heinemann, UK, (2006), 384 pp. ISBN–10: 0-7506-6754-0
- [25] Peterson G.P. and Ma H.B., Temperature Response of Heat Transport in a Micro Heat Pipe, *Journal of Heat Transfer*, 121 (2) (1999): 438-445. <http://doi.org/10.1115/1.2825997>