

Optimisation de la Performance d'un Collecteur Solaire Cylindro – parabolique à Caloduc : Réalisation et Dimensionnement du Caloduc

M. Belhamel

Laboratoire Thermique, Centre de Développement des Energies Renouvelables
B.P. 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah – Alger - Algérie.
(Accepté le 15. 05 .99)

Résumé — *Cet article présente un caloduc utilisé dans les systèmes d'exploitation de l'énergie solaire. Le modèle analytique, capable de prédire les limitations maximales du flux de chaleur véhiculé par changement de phase au moyen d'une substance très quelconque mais pure (fluide organique, alcool, eau, métal etc.) piégée dans ce caloduc qui est une enceinte hermétique à géométrie cylindrique de faible diamètre par rapport à sa longueur, sera décrit. Les très nombreuses contraintes de conception et de fabrication (plusieurs opérations indépendantes) et les précautions exigées pour sa mise au point (dégazage, introduction de la structure capillaire, remplissage, soudage etc.) sont présentées.*

Abstract — *This paper presents a heat pipe used in solar energy use. An analytical model capable of predicting the maximum limitations of heat flux conveyed by a change of phase using a very usual but pure substance (organic fluid, alcohol, water, metal, etc.) trapped in an airtight enclosure having a cylindrical shape with a small diameter compared to its length, will be described.*

The numerous constraints of design and manufacturing (several independent operations) and the precautions needed (outgasing, introduction of the capillary structure, filling, soldering etc.) are reported.

Mots clés : Caloduc - Limitations maximales du flux de chaleur - Changement de phase - Fluide caloporteur - Pression motrice capillaire - Limites visqueuse – Limite sonique – Limite d'entraînement – Limite capillaire – Limite d'ébullition.

1. INTRODUCTION

Les caloducs représentent la méthode passive la plus effective de transférer de grande quantité de chaleur sous de faibles gradients de températures. Depuis leur invention, différents types ont été réalisés, testés et mis en fonctionnement [1-4].

Le principe de fonctionnement des caloducs 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.

La structure capillaire assure le transfert calorifique dans n'importe quelle position par rapport à l'horizontale même à l'encontre de la gravité conférant à ce dispositif une maniabilité et des performances de transfert calorifique sans commune comparaison avec tous les autres modes classiques de transfert de chaleur. Ce dispositif offre une conductibilité thermique de 100 à 10000 fois celle du meilleur conducteur métallique [5].

Les caloducs sont utilisés dans diverses applications couvrant pratiquement l'ensemble des températures rencontrées dans les processus de transfert thermique [6, 7]. Ces applications vont des applications à basse température, telles que les sondes cryogéniques utilisées en médecine pour traiter les tumeurs et les caloducs à hélium liquide pour refroidir les cibles dans les accélérateurs de particules élémentaires, aux nouvelles techniques de mesures dans la

gamme des températures de 2000 °C à 3000 °C, en passant par les applications de refroidissement des composants électroniques et les techniques de captation et de conversion de l'énergie solaire[8 - 11].

Dans le présent article, l'étude est consacrée à la réalisation et au dimensionnement d'un caloduc utilisé dans un collecteur solaire cylindro - parabolique. Le schéma de ce collecteur est montré en figure 1. Ce caloduc de 3 mètres de long exploite l'adaptation d'un flux solaire concentré au moyen d'un collecteur cylindro- parabolique à miroirs segmentés en position altazimuthale.

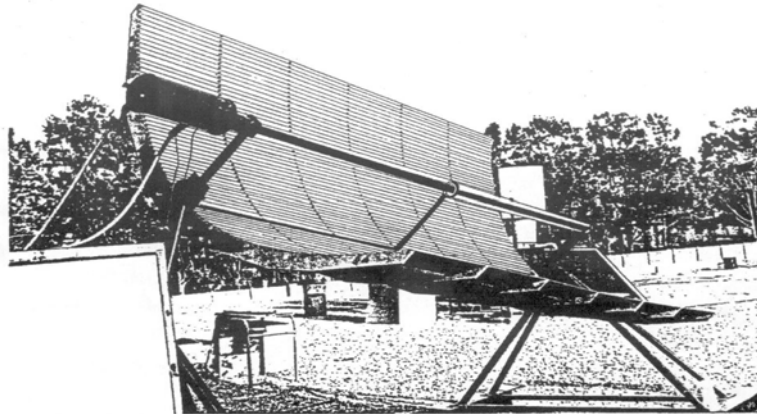


Fig.1 : Collecteur solaire cylindro – parabolique à caloduc (ENITA- Algérie)

2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

2.1. Inéquation de fonctionnement

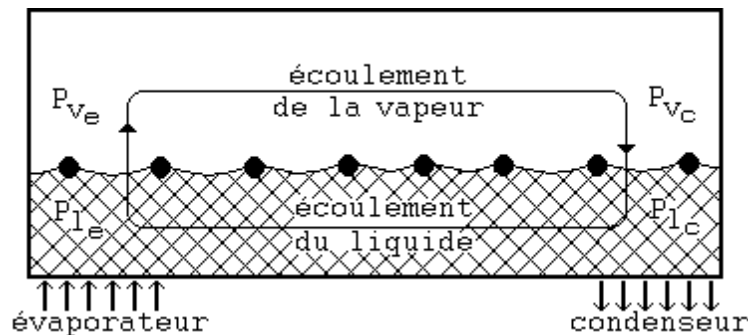


Fig. 2: Cycle parcouru par le fluide caloporteur dans un caloduc en fonctionnement.

Au cours du fonctionnement du caloduc [12], le fluide caloporteur parcourt un cycle qui peut-être décomposé, comme présenté en figure 2, en quatre phases bien distinctes:

1. Phase 1: Evaporation du liquide caloporteur à l'évaporateur, laquelle s'accompagne d'une absorption d'énergie calorifique.
2. Phase 2: Entraînement de la vapeur ainsi formée du fait de la différence de pression entre l'évaporateur et le condenseur.
3. Phase 3: Condensation de la vapeur, laquelle s'accompagne d'une libération d'énergie calorifique emmagasinée lors de la vaporisation.
4. Phase 4: Retour du liquide du condenseur vers l'évaporateur, au moyen de la structure capillaire.

Ainsi, dans ce cycle, comme dans tout fonctionnement similaire en régime stationnaire, la chute totale de pression doit être nulle, ce qui implique:

$$\Delta P_v + \Delta P_l = (P_v - P_l)_e - (P_v - P_l)_c \quad (1)$$

où : ΔP_v , ΔP_l sont relatifs aux chutes de pressions respectivement dans les phases vapeur et liquide.

$(P_v - P_l)_e$, $(P_v - P_l)_c$ sont relatifs aux chutes de pressions à l'interface liquide - vapeur respectivement dans l'évaporateur et le condenseur. La différence de ces chutes de pression, notée ΔP_C , caractérise l'effet de pompage de la structure capillaire et est appelée souvent "pression motrice capillaire".

Avec cette nouvelle notation l'équation de fonctionnement du caloduc s'écrit

$$\Delta P_v + \Delta P_l = \Delta P_C \quad (2)$$

Cependant pour que le retour du liquide caloporteur soit toujours assuré, il faut que la somme des chutes de pression dans les phases vapeur et liquide soit inférieure ou, à la limite, égale à la pression motrice capillaire maximale $\Delta P_{C_{max}}$ de la structure capillaire utilisée, laquelle est atteinte théoriquement dans le cas limite où $(P_v - P_l)_c = 0$, d'où la condition nécessaire de fonctionnement d'un caloduc :

$$\Delta P_v + \Delta P_l < \Delta P_{C_{max}} \quad (4)$$

2.2. limites de fonctionnement

Les limites de fonctionnement d'un caloduc ont fait l'objet de nombreuses études tant expérimentales que théoriques [13 – 16]. On peut les grouper en deux sortes celles relatives à l'écoulement du liquide dans la structure capillaire et celles relatives à l'écoulement de la vapeur dans son conduit.

En supposant la température de l'évaporateur T_e fixée et celle du condenseur T_c variable et décroissante, on peut suivre l'évolution schématique du flux axial moyen ϕ_m d'énergie transférée par le caloduc en fonction de l'écart $\Delta T = T_e - T_c$ sur le diagramme montré en figure3.

- si $\Delta T = 0$, le liquide et la vapeur sont en équilibre thermodynamique à la température $T = T_e = T_c$ et le flux calorifique axial transféré est nul.

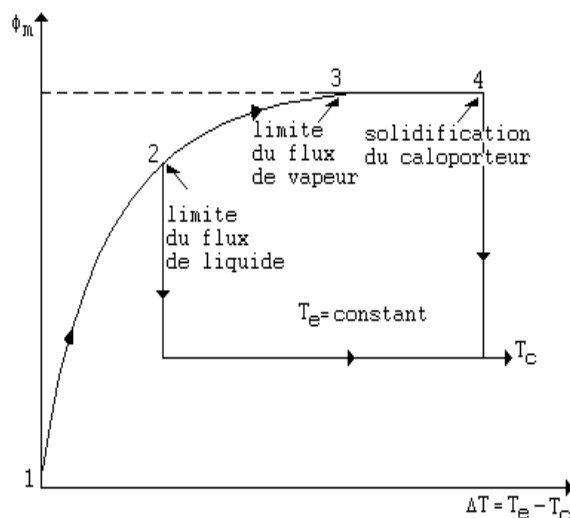


Fig. 3 :Variation du flux axial moyen d'énergie calorifique en fonction de l'écart de température entre les températures de

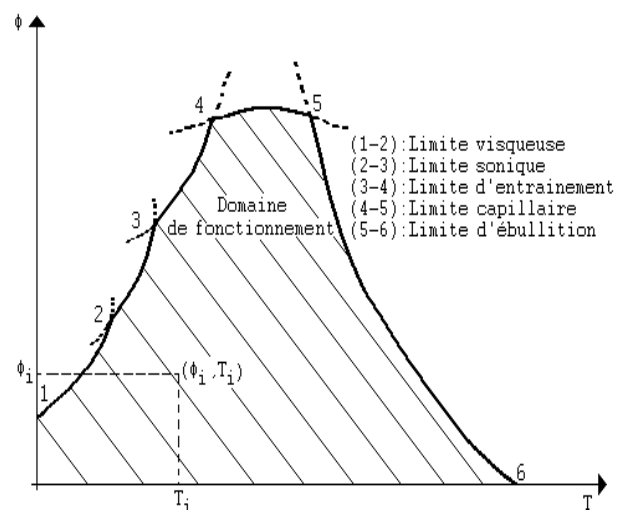


Fig. 4: Variation de la puissance axiale limite transférée en fonction de la température de fonctionnement

l'évaporateur et du condenseur.

- si maintenant on fait décroître T_c le flux axial transféré va augmenter rapidement avec ΔT jusqu'au point (2) à partir duquel il va tomber brusquement à une valeur très faible pour ne remonter qu'ensuite très faiblement. Cette chute brutale du flux calorifique axial transféré a son origine dans l'interruption de la circulation du fluide caloporteur. On peut en chercher les origines :
 - soit dans un retour insuffisant du liquide du fait de son entraînement par la vapeur à l'interface liquide- vapeur. La limite est dite alors limite d'entraînement,
 - soit dans un pompage insuffisant de la structure capillaire laquelle n'assure plus le retour du liquide du condenseur vers l'évaporateur. Cette limite est dite alors limite capillaire.
 - soit dans la formation de bulles dans la structure capillaire au niveau de l'évaporateur lors de fortes densités d'énergie calorifique, d'où un assèchement et une surchauffe rapide. La limite est dite limite d'ébullition.

Si l'on arrive à reculer maintenant les limites dues à l'écoulement du liquide par l'emploi de structures capillaires très performantes (et c'est pratiquement possible), on constate, sur le même diagramme et au au-delà du point (3), l'apparition d'un palier (3)-(4) traduisant la constance du flux calorifique moyen transféré ϕ_m en fonction de l'écart ΔT jusqu'à une certaine valeur correspondant à la solidification du fluide caloporteur (4). Ce palier est lié à l'écoulement de la vapeur et ne peut-être reculé comme précédemment en agissant sur la structure capillaire. Deux cas limites peuvent alors se présenter:

1. Le premier est dû au fait qu'une augmentation de la vitesse de la vapeur par expansion adiabatique s'accompagne d'une diminution de sa masse volumique et lorsque les deux effets se compensent exactement, le flux massique de vapeur ne peut plus augmenter par une diminution de pression [11]. Ce phénomène apparaît lorsque le rapport de pression entre la fin et le début de l'évaporateur est égal à 1/2. La vapeur quitte alors l'évaporateur avec une vitesse sonique d'où l'appellation de cette limite.
2. Le second est dû au fait que la pression de vapeur au niveau du condenseur ne saurait être plus basse que zéro (cas limite correspondant à la solidification du fluide caloporteur lequel est dû à un refroidissement excessif). Cette limite qui se présente dans le domaine des températures où l'écoulement est essentiellement visqueux est dite alors limite visqueuse [12].

2.3. domaine de fonctionnement

Si l'on traduit, sur un diagramme (fig. 4), l'évolution de la puissance axiale en fonction de la température T de fonctionnement correspondant à la température moyenne dans la phase vapeur, on constate que les limites précédentes se traduisent par des portions de courbes qui se substituent progressivement l'une à l'autre lors de la montée en température.

L'enveloppe (1-2-3-4-5-6) constituée par les différentes portions de courbes limites est appelée "courbe limite de fonctionnement de caloduc", courbe sous laquelle est située le domaine de fonctionnement et dans lequel plusieurs évolutions sont théoriquement possibles (zone hachurée de la figure 3).

Ainsi, loin des conditions limites, le fonctionnement d'un caloduc, dont les caractéristiques géométriques et physiques sont fixées, est essentiellement conditionné par son mode de chauffage et de refroidissement. Il est possible, en agissant soit sur l'un soit sur l'autre, ou simultanément sur les deux, de faire véhiculer au caloduc de multiples puissances calorifiques ϕ_i appartenant au domaine de fonctionnement.

Les expressions donnant les différentes limitations ont fait l'objet de fastidieux développement

[17 - 20]. Nous en rappelons ci-après les résultats ayant servis à l'élaboration du modèle analytique proposé:

$$1. \text{ Limite visqueuse - région (1-2) : } \quad QLV = \frac{\pi r_v^4}{16L_{\text{eff}}} \left(\frac{\rho_v \ell P_v}{\mu_v} \right)_e \quad (4)$$

$$\text{avec : } L_{\text{eff}} = L_t + 0.5(L_e + L_c)$$

$$2. \text{ Limite sonore - région (2-3) : } \quad QLS = \pi r_v^2 \rho_v \ell \left(\frac{\gamma_v RT_v}{2(\gamma_v + 1)} \right)^{1/2} \quad (5)$$

γ_v étant le rapport des chaleurs spécifiques à pression et volume constants et est égal à $\frac{5}{3}$ pour un gaz monoatomique, $\frac{7}{3}$ pour un gaz diatomique et $\frac{4}{3}$ pour un gaz polyatomique.

$$3. \text{ Limite d'entraînement- région (3-4) : } \quad QLE = \pi r_v^2 \left(\frac{2\pi}{\delta} \rho_v \sigma \right)^{1/2} \ell \quad (6)$$

δ étant une longueur qui caractérise l'interface liquide- vapeur.

$$4. \text{ Limite capillaire- région (4-5) : } \quad QLC = \dot{m} \ell \quad (7)$$

1er Cas : Ecoulement de la vapeur LAMINAIRE

L'équation de fonctionnement (3) est du second degré en \dot{m} , dont il faut retenir la solution positive pour en déduire la limite capillaire:

$$\frac{0.074}{\rho_v r_v^4} \dot{m}^2 + \left(\frac{8\mu_v L_t}{\pi \rho_v r_v^4} + \frac{\mu_1 L_{\text{eff}}}{\rho_1 K A_w} \right) \dot{m} + g\rho_1 L \sin \theta - \frac{2\sigma}{r_m} \cos \alpha = 0 \quad (8)$$

2ème Cas : Ecoulement de la vapeur TURBULENT

L'équation de fonctionnement (3) se transforme en équation polynomiale :

$$C_1 \dot{m}^{2.75} + C_2 \dot{m}^2 + C_3 \dot{m} + C_4 = 0 \quad (9)$$

$$\text{avec } \begin{cases} C_1 = -\frac{Y(L_c + L_e)}{2.75} + Y L_t \\ C_2 = \frac{\mu_1 L_{\text{eff}}}{\rho_t A_w K} \\ C_3 = \frac{2\sigma}{r_m} \cos \alpha + g\rho_1 L \sin \theta \\ C_4 = \frac{0.016}{4r_v} ZN^3 (L_e + L_c) + \frac{Y(L_e + L_c)N^{2.75}}{2.75} \end{cases} \quad (10)$$

et N, X, Y et Z sont donnés par les expressions suivantes :

$$N = 1000\pi r_v \mu_v \quad X = \left(\frac{\pi r_v \mu_v}{2} \right)^{0.25}$$

$$Y = \frac{0.316X}{4\pi^2 \rho_v r_v^5} \quad Z = (\pi^2 \rho_v r_v)^{-1}$$

Il faut noter que la méthode de Newton donnera la solution à l'approximation désirée.

$$5. \text{ Limite d'ébullition- région (5-6) : } \quad QLB = \frac{4\pi L_e \sigma T_v \lambda_{\text{eff}}}{\ell \rho_v \ln\left(\frac{r_i}{r_v}\right)} \left(\frac{1}{r_\eta} - \frac{\cos \alpha}{r_m} \right) \quad (11)$$

$$\text{avec } \lambda_{\text{eff}} = \frac{\lambda_1 [(\lambda_1 + \lambda_w) - (1 - \varepsilon)(\lambda_1 - \lambda_w)]}{[(\lambda_1 + \lambda_w) + (1 - \varepsilon)(\lambda_1 - \lambda_w)]} \quad (12)$$

3.DIMENSIONNEMENT DU CALODUC

3.1. Choix du couple fluide caloporteur – matériau du caloduc

Le choix est dicté non seulement par la gamme de température de fonctionnement du caloduc, mais aussi par la bonne compatibilité physico – chimique du fluide caloporteur et du matériau constituant le caloduc.

Le nombre de mérite défini par $M = \frac{\sigma_1 \rho_1 L}{\mu_1}$ permet de comparer, pour divers fluides, les capacités de transfert thermique dans la gamme de température de fonctionnement. Dans le tableau 1, ont été reportés le nombre de mérite et les paramètres permettant un bon choix du couple fluide caloporteur – matériau du caloduc[7].

Tableau 1 : Estimation du nombre de mérite

Calo	Azote	Propane	Ammoniac	Fréon 12	Méthanol	Eau	Mercure	Potassium	Sodium	Lithium	Argent
T _c (°C)	-147.5	+95	+132	+112	+240	+374	1677		1690	2200	
B	Acier inox Nickel Cuivre	Acier Cuivre	Aluminium Nickel Acier inox		Cuivre Acier inox	Cuivre e	Acier inox Magnésium Titane	Nickel Acier inox	Nickel Acier inox	Niobium Zirconium	Tantale Tungstène
M ($\frac{W}{cm^2}$)	1000 à -195 °C		10 000 à -60°C	690 à +20°C	3300 à +20°C	80000 à +130° C	1.6 10 ⁵ à +360°C	5.4 10 ⁵ à +700°C	2.25 10 ⁵ à +20°C		

T_c : Température Critique B : Structure Capillaire et Tube enveloppe Calo: Caloporteur

M : Nombre de mérite

Les résultats de ce tableau, le choix suivant s'est imposé :

- Le cuivre est pris comme matériau de l'enceinte et de la structure capillaire
- L'eau est prise comme fluide caloporteur.

Les caractéristiques physiques et géométriques de l'enceinte du caloduc :

Géométrie	Tubulaire	Diamètre	40 mm
Longueur de l'évaporateur	300 cm	Longueur du condenseur	30 cm
Longueur de la zone de transfert	20 cm	Longueur totale du caloduc	350 cm

3.2 Caractéristiques de la structure capillaire

Le choix du nombre de mèche Me est dicté par :

- L'ascension capillaire A qui caractérise l'effet de pompage de la structure capillaire.
- La porosité ε qui exprime le rapport du volume liquide saturant les pores au volume total de la structure capillaire.
- La perméabilité K qui caractérise la section de passage du liquide à travers la section totale de la structure capillaire.

Ces différents paramètres ont été estimés (7, 21.) pour des nombres de mèche M compris entre 40 et 200. Les résultats sont reportés au tableau . Le nombre de mèche qui optimise ces paramètres est 60.

Tableau 2 : Caractéristiques de la structure capillaire

Me	d_f (10^{-3} m)	d_m 10^{-3} m)	ε	K (10^{-10})	A (10^{-2})			K_{eff} W / m °K
					100 °C	200 °C	300 °C	
40	0.24	0.400	0.69	16.1	3.13	2.78	1.29	37.7
60	0.18	1.40	0.67	5.9	3.69	3.27	1.51	42.38
100	0.11	0.145	0.64	2.1	8.64	7.68	3.55	43.56
150	0.06	0.110	0.71	1.2	11.40	10.12	4.68	35.36
200	0.05	0.078	0.69	0.5	16.07	14.27	6.60	37.70

Figure 5 montre schématiquement l'arrangement géométrique de la structure capillaire.

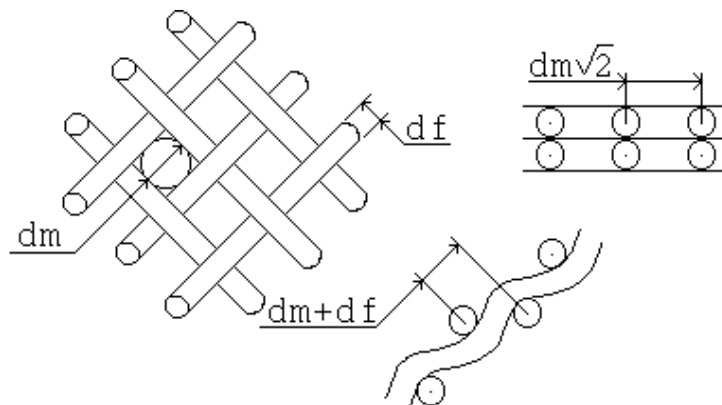


Fig. 5 : Arrangement géométrique de la structure capillaire

Les caractéristiques physiques et géométriques de la structure capillaire adoptée sont alors :

Géométrie de la structure	Carré	Nombre de mèche	60
Diamètre du fil	0,18 mm	Epaisseur du fil	0,36 mm
Diamètre du maillage	0,34 mm	Porosité	0,67
Nombre d'enroulement	3		

3.3 Préparation du caloduc

Afin d'assurer un bon fonctionnement et une longue durée de vie, le caloduc doit être soumis à une série d'opérations. Ces opérations sont résumées en figure 7

L'opération de décapage des différents éléments du caloduc se fait à l'acide Bickling suivi d'un lavage à l'eau distillée, d'un dégraissage au trichloréthylène, de nouveau d'un lavage à

l'eau distillée et d'un dégraissage au méthanol, et finalement d'un lavage à l'eau distillée.

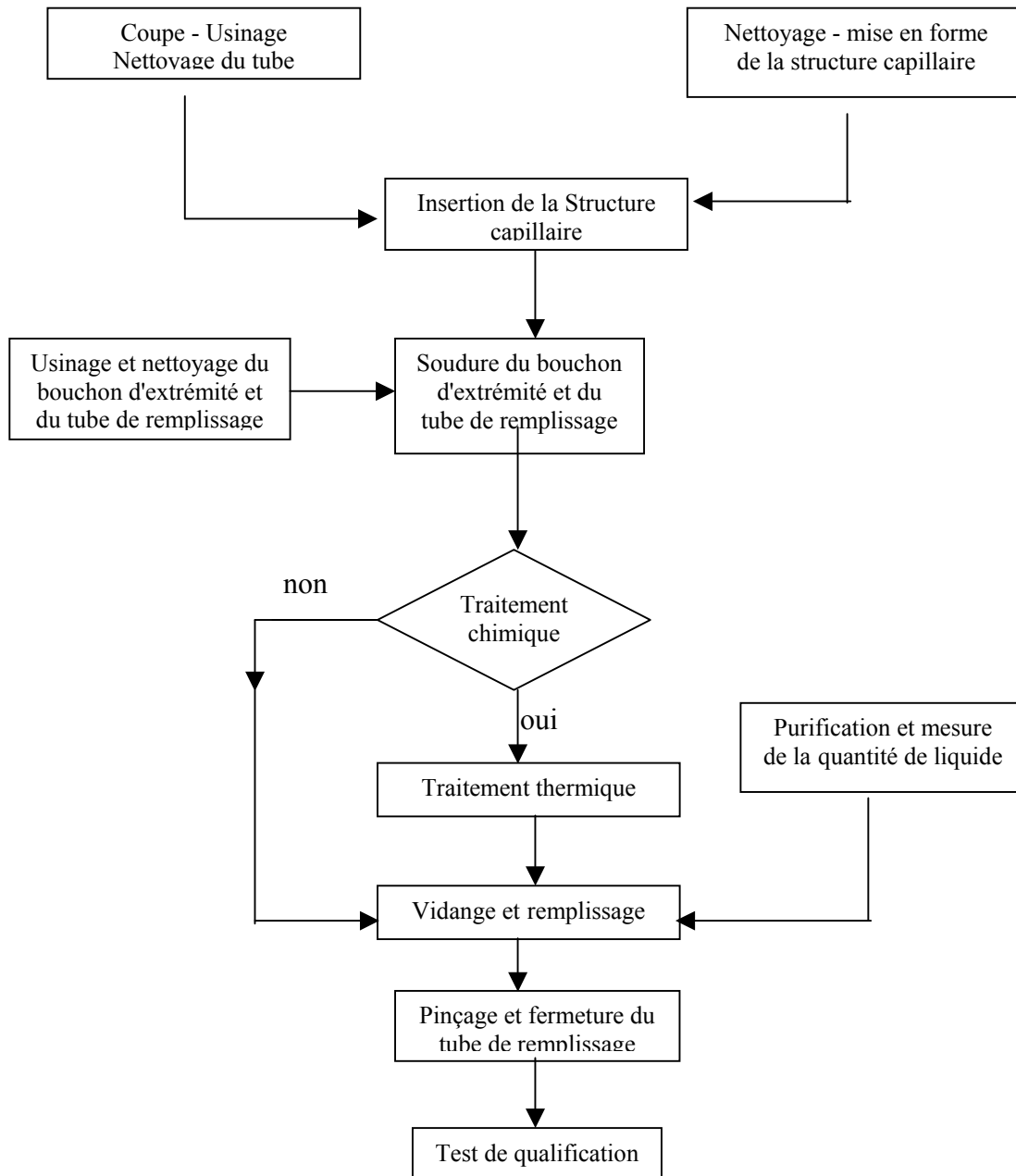


Fig. 6 : Opérations de réalisation du caloduc

Figure 6 montre schématiquement les opérations de dégazage et de remplissage du caloduc.

Les étapes suivies sont :

- Dégazage de l'enceinte du caloduc : Le caloduc est placé à l'intérieur du four avec vanne 4 et vanne 5 ouvertes et vanne 3 fermée. La température du four est lentement augmentée jusqu'à atteindre une valeur supérieure à la température maximale de fonctionnement du caloduc. Cette température est maintenue jusqu'à stabilisation d'un vide dans l'enceinte du caloduc de l'ordre de 10^{-6} torr pendant au moins trois heures.
- Dégazage du fluide caloporteur : Le récipient contenant le fluide caloporteur est plongé dans le réservoir d'azote liquide (vanne 1 ouverte) jusqu'à solidification de ce fluide caloporteur. L'agitateur est activé (moteur M en marche) et vanne 2 est ouverte. Avec le

vide dans le récipient atteignant un niveau satisfaisant, le fluide caloporteur est liquéfié.

- Remplissage du caloduc : Après dégazage, vanne 4 est fermée. Le remplissage est accompli en agissant sur vanne 3.

Pour un bon fonctionnement du caloduc, il est important que la structure capillaire au niveau de la zone d'évaporation soit constamment saturée du fluide caloporteur en phase liquide. Un remplissage insuffisant conduit à un assèchement rapide, tandis qu'un remplissage excessif réduit la surface d'évaporation. Dans le cas présent, le volume nécessaire à la saturation est de 0,3 l. En adoptant un excès de 0,2 l, le volume total adopté est de 0,5l.

3.4 Qualification du caloduc

Une fois le remplissage effectué, le tube de remplissage est pincé et soudé aussi méticuleusement que possible.

Les caractéristiques (7) de ce caloduc sont les suivants :

Pression motrice capillaire	$3,53 \cdot 10^2 \text{ N/m}^2$
Débit de vapeur	1,8 g/l
Zone de transfert	
Vitesse d'écoulement	0,11 m/s
Nombre de Reynolds axial	3342
Evaporateur	
Chute de température	242,2 °C
Vitesse radiale	$0,32 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
Nombre de Reynolds radial	5
Longueur limite du passage de l'écoulement laminaire au turbulent	1,85 m
Condenseur	
Chute de température	180 °C
Vitesse radiale	$3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
Nombre de Reynolds	49
Longueur limite du passage de l'écoulement turbulent au laminaire	18,5 cm

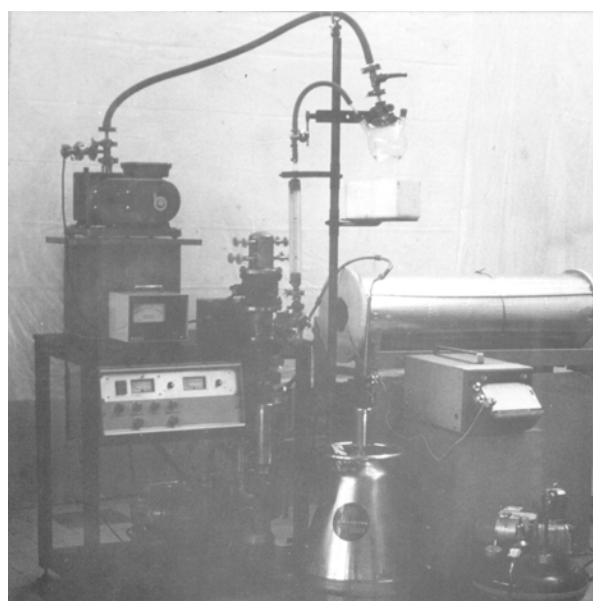
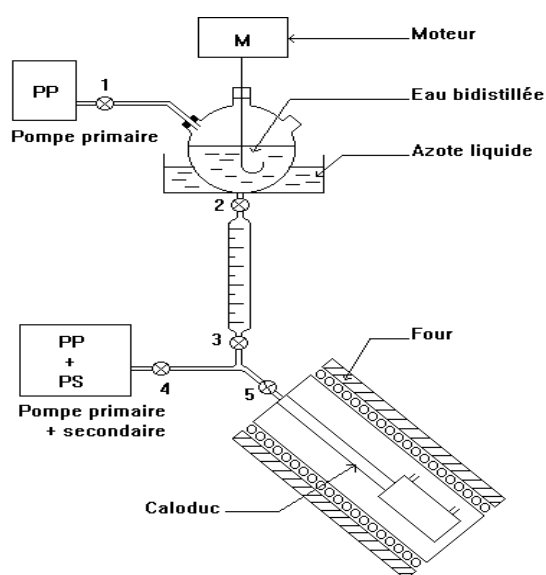


Fig. 7 : Installation de dégazage et de remplissage du caloduc

4. CONCLUSION

Considérant la lenteur du processus de fabrication (plusieurs opérations indépendantes), les nombreuses précautions exigées (dégazage, pose de la structure capillaire, soudure...) le coût excessif du matériel nécessaire (appareillage de mise au point et de contrôle...) l'outil informatique dans ce domaine particulier où le nombre de paramètres est considérable, offre sans aucun doute des avantages certains pour orienter avantagement la recherche expérimentale au voisinage immédiat des performances limites de transfert thermique assurées par les caloducs pour une utilisation sûre et sans crainte aucune à l'intérieur du domaine de fonctionnement recherché dans lequel une infinité de évolutions reste possible.

NOMENCLATURE

ρ : masse volumique	T : température de fonctionnement
α : angle de contact entre le liquide et la structure capillaire	L : longueur du caloduc
ℓ : chaleur latente de vaporisation du caloporteur	λ : conductivité thermique
μ : viscosité dynamique du caloporteur	r : rayon
σ : tension superficielle du caloporteur	<u>Indices</u>
\dot{m} : débit massique	i : intérieur
A_w : section de la structure capillaire	l : liquide
r_m : rayon minimum inscrit dans la maille	v : vapeur
K : perméabilité de la structure capillaire	e : évaporateur
R : constante des gaz parfaits	t : zone de transfert
g : accélération de la pesanteur	w : structure capillaire
P : pression locale	η : nucléation
	θ : inclinaison de l'axe du caloduc par rapport à l'horizontale

Remerciements: — L'auteur tiens à remercier Dr A. Khellaf pour ses suggestions et sa lecture critique du manuscrit.

REFERENCES

- [1] T.P Cotter , "*Theory of heat pipes*" Rapport 3246 MS Los Alamos - 1965
- [2] G.M grover, J. BOudansky and C.A. Busse , Rapport EUt 2229, Ispra, Italy -
- [3] R Pruschek, M. Schindler und K. Moritz, "*Das Warmerohr (heat pipe)*" Institut fur kernenergetik der Teelinischen Hochschule, Stuttgart – 1967
- [4] Institut Für Kernenergetik, Universitat Stuttgart, 7000, Olderbuscieveg 52 5 (R. F. A.)
- [5] E. Schmidt et R. Semeria, "*Détermination théorique et expérimentale de la puissance thermique transférée par les caloducs à Sodium*" C. E. N. Grenoble – 1968
- [6] Huges Aircraft Co, "*Electron Dynamics*," Div. 3100-West Lornita Boulevard, Torrance, California 90509(U.S.A.)
- [7] J. Martinet, "*Les caloducs et leurs applications*" Revue Générale de Themique 192 (1977)865
- [8] M. Belhamel, "*Collecteur de rayonnement solaire original à caloduc*," ENITA, Laboratoire de Mécanique et d'Énergétique, Bordj El-Bahri , Algérie 1981
- [9] Keddy, E, Sena, J.T., and Merrigan, M., "*Development of an integrated heat pipes thermal storage system of a solar receiver*", AIAA paper 88.2683, June 1988

- [10] D. R. Adkins, "*High-flux testing of heat pipes for point-focus solar collector systems*" Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico – 1993
- [11] K. A. R. Ismail et M. M. Abogderah, "*Performance of a Heat Pipe Solar Collector*", J. Sol. Energy Eng. 120(1998)51.
- [12] Y. Kamotoani, Final report to NASA Lewis Research Press, Cleveland, Ohio, USA (1981)
- [13] B.D. Marcus, "*Theory and Design of Variable Conductance Heat pipe*", NASA, C. R 2018. - 1972
- [14] El.Genk, M.S., and Seo, J.T., "*A Transient Model for Liquid – Metal Heat pipes*" Transaction of the 5th Symposium on Space Nuclear Power Systems, Institut for Space Nuclear Power Studies, University of New Mexico, Albuquerque, NM, 1988
- [15] Y. Cao et A. Faghri "*Transient Multidimensional Analysis of Nonconventional Heat Pipes with Uniform and Nonuniform Heat Distributions*". ASME Journal of Heat Transfer 113(1991)995.
- [16] J.M. Tournier et M. S. El.Genk, "*Modeling of the startup of water heat pipe from frozen state*". National Heat Transfer Conference, August 5-9 1995 Portland – Oregon.
- [17] M. Belhamel , "*Domaine de fonctionnement d'un caloduc*," ENSMA, Laboratoire des Transferts Thermiques, Poitiers, France 1979
- [18] B. K. LEVY, "*Effects of friction on the sonic velocity limit in sodium heat pipes*,"
- [19] M. Belhamel et J. Martinet, "*Stabilité de fonctionnement d'un caloduc*" ENSMA, Laboratoire des transferts thermiques, Poitiers, France 1978
- [20] Ihl Youg Kim and Peter C. Wayner, Jr, "*Effect of thin film heat transfert on the apparent angle and capillary suction* IX International Heat pipe Conference Albuquerque, May 1-5, 1995
- [21] P. D. Dun et D. A. Reay, "*Heat Pipes*", 3rd edition, Pergamon Press, Oxford (1982).