

# Boucle fluide cryogénique à pompage capillaire : Présentation du concept

Philippe GULLY, Peter SEYFERT, Pierre THIBAUT, Laurent GUILLEMET

CEA-Grenoble  
Service des Basses Températures,  
UMR E CEA-UJF - Commissariat à l'Énergie Atomique Laboratoire, Université Joseph Fourier  
Grenoble  
17, rue des Martyrs – 38054 Grenoble Cedex 9  
philippe.gully@cea.fr

**Résumé** - L'observation terrestre par satellites et plus généralement celle des planètes et du ciel nécessite souvent des détecteurs refroidis à des températures cryogéniques (jusqu'à 4K, voire même en dessous) par des réfrigérateurs très performants. Le Service des Basses Températures du CEA-Grenoble travaille sur cette thématique depuis de nombreuses années. Un des besoins récemment identifié concerne les liens thermiques cryogéniques nécessaires à la distribution de la puissance frigorifique dans les satellites. Le concept de boucle fluide à pompage capillaire permet le transport efficace de l'énergie thermique sur une grande distance par circulation diphasique d'un fluide dans un circuit sous l'effet des forces capillaires générées par l'évaporation d'un liquide au sein d'une mèche capillaire. Il est couramment utilisé dans le domaine spatial avec des fluides qui sont liquides à température ambiante. La mise en œuvre de ce concept à des températures cryogéniques nécessite l'adjonction d'un réservoir chaud et d'une boucle secondaire pour une mise en froid et un amorçage efficaces. Dans une première partie, on présente le dimensionnement thermo hydraulique d'un premier prototype fonctionnant à l'azote et capable de transférer 10W de puissance frigorifique. Ce dimensionnement s'appuie en particulier sur la caractérisation expérimentale de la pression capillaire et de la perméabilité de la mèche capillaire utilisée. On décrit également le prototype réalisé, instrumenté en particulier d'une mesure capacitive de taux de vide au sein du cœur liquide de l'évaporateur principal, ainsi que le cryostat utilisé pour les tests.

## Nomenclature

$H$	hauteur, $m^2$	$\bar{r}_{Géom}$	rayon moyen de pore, $m$
$K$	perméabilité, $m^2$	$r_{Laplace}$	rayon de Laplace, $m$
$P$	pression, $Pa$	$T$	température, $K$
$\dot{Q}$	puissance, $W$		
<i>Symboles grecs</i>			
$\Delta P_{Capillaire}$	pression capillaire	$\mu$	viscosité, $Pa.s$
$\sigma$	tension superficielle, $N/m$		
<i>Indices et exposants</i>			
$C$	chaud (paroi évaporateur)	$V$	vapeur
$F$	plan froid	$P$	principal
$IN$	input	$S$	secondaire
$L$	liquide	$Sat$	saturation

## 1. Introduction

Le Service des Basses Températures (SBT) du CEA-Grenoble est fortement impliqué dans le développement de cryo-réfrigérateurs pour le refroidissement de détecteurs placés sur satellites. La tendance actuelle est à l'augmentation des puissances frigorifiques consommées

ainsi qu'à l'abaissement des températures afin d'augmenter la sensibilité des détecteurs. Le lien thermique communément utilisé est un simple contact mécanique par assemblages boulonnés. Ce montage présente des inconvénients en termes de souplesse d'intégration et de couplage vibratoire entre le réfrigérateur, parfois générateur de vibrations, et les performances du détecteur potentiellement amoindries par ces vibrations. Le concept de boucle fluide à pompage capillaire présente des atouts pour contourner ces difficultés en permettant le transport de la puissance frigorifique sur une grande longueur à travers des tuyauteries de faible diamètre.

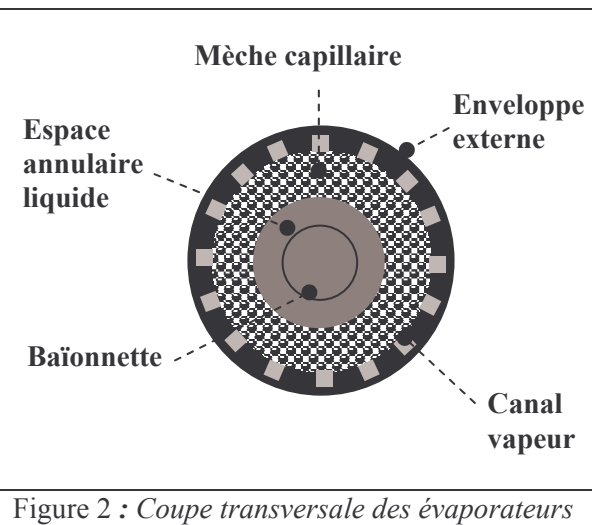
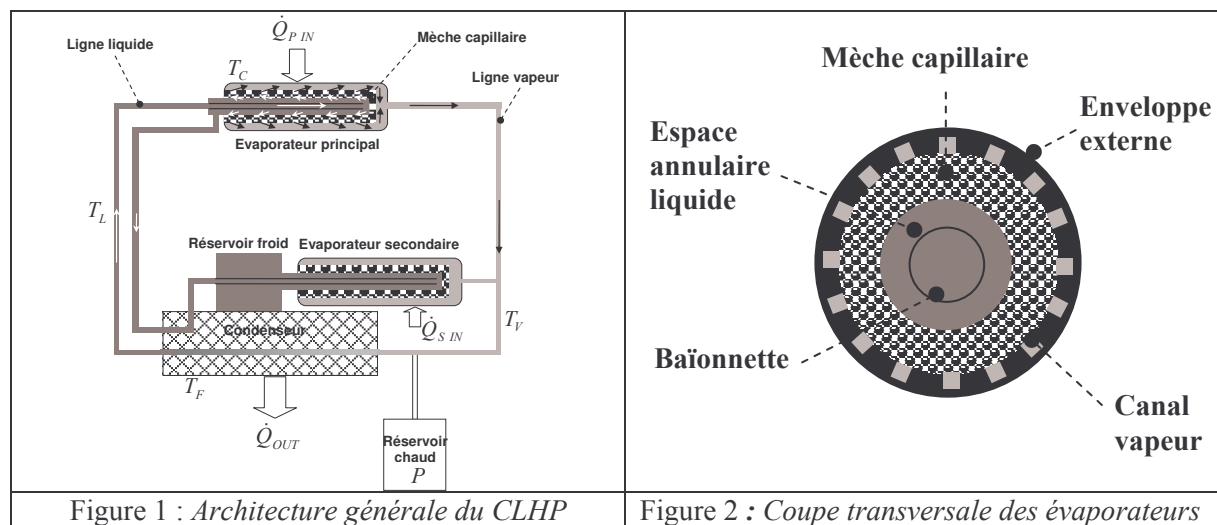
Une étude bibliographique a permis de montrer que ce concept était étudié aux Etats-Unis ([1], [2], [3], [4], [5]) pour différents fluides cryogéniques (éthane, oxygène, azote, néon, hydrogène). Une puissance à transporter de l'ordre de 10W à une température voisine de 80K a été ciblée. L'azote plus simple à utiliser que l'oxygène, ayant été choisi comme fluide caloporteur, c'est le concept de « Cryogenic Loop Heat Pipe » (CLHP) qui a été choisi pour être évalué par le SBT.

Dans ce papier, on présente le concept, certains aspects de son dimensionnement thermohydraulique, l'instrumentation mise en œuvre pour son évaluation ainsi que le cryostat utilisé pour les tests.

## 2. Description et dimensionnement du prototype

### 2.1. Principe de fonctionnement

L'architecture générale du CLHP (Cryogenic Loop Heat Pipe) est issue d'un concept américain [3] et est présentée sur la Figure 1



Le CLHP comporte une boucle principale composée d'un évaporateur, d'un condenseur reliés par des tuyauteries liquide et vapeur. La puissance électrique  $\dot{Q}_{P\ IN}$  appliquée sur les parois externes de l'évaporateur permet une évaporation du liquide en surface d'une mèche capillaire qui génère la pression capillaire nécessaire pour faire circuler le fluide dans la boucle. Le condenseur se compose d'une simple tuyauterie thermiquement liée à un plan froid refroidi par une machine froide (non représentée sur la Figure 1). Il permet de désurchauffer la vapeur y entrant, de la condenser ainsi que de sous refroidir le liquide. Une boucle secondaire et un réservoir chaud (à température ambiante) y sont ajoutés. La boucle secondaire est composée d'un petit condenseur, d'un réservoir froid et d'un évaporateur. La fonction principale de la boucle secondaire est de permettre une mise en froid rapide de la

boucle principale, en particulier celle de son évaporateur. Au cours de la phase de refroidissement, le liquide condensé dans le réservoir froid est transféré par gravité dans l'évaporateur secondaire. L'application d'une puissance électrique  $\dot{Q}_{S\ IN}$  sur l'évaporateur secondaire permet, grâce à la pression capillaire, de générer un écoulement secondaire froid vers l'évaporateur principal qui finit par se gorger de liquide. Une autre fonction de la boucle secondaire est le détournement d'une partie du débit de la boucle grâce à l'application sur son évaporateur d'une puissance  $\dot{Q}_{S\ IN}$  pour évacuer les pertes thermiques par rétro-conduction de la mèche capillaire principale. Le réservoir chaud permet quant à lui un remplissage de la boucle en gaz à température ambiante afin de limiter la pression en dessous de la pression critique et ainsi de favoriser la condensation du fluide dans le réservoir froid.

## 2.2. Données du dimensionnement

Les données utilisées pour le dimensionnement sont les suivantes :

- Puissance appliquée sur l'évaporateur principal :  $\dot{Q}_{P\ IN} = 10W$
- Puissance appliquée sur l'évaporateur secondaire :  $\dot{Q}_{S\ IN} = 5W$
- Température du plan froid :  $T_F = 80K$
- Température de l'évaporateur :  $T_C = 82K$
- Température de saturation :  $T_{sat} \approx T_C \Rightarrow T_V \approx T_{sat}$
- Sous saturation du liquide en sortie du condenseur :  $T_{sat} - T_L = 1.5K$

Dans ce qui suit on néglige les entrées de chaleur parasites.

## 2.3. Géométrie et matériaux

La géométrie du CLHP conçu est présentée sur le Tableau 1. Les deux évaporateurs sont de géométrie identique et comportent une mèche capillaire tubulaire montée dans une enveloppe externe en cuivre munie de canaux vapeur longitudinaux (Figure 2). La partie centrale de l'évaporateur constituant le cœur liquide est munie d'une baïonnette, de telle sorte que le liquide circule dans un espace annulaire avant d'être aspiré radialement dans la mèche capillaire.

		<i>Diamètre</i>	<i>Longueur</i>	<i>Matériau</i>
		<i>Externe</i>		
		<i>mm</i>	<i>mm</i>	
Boucle principale	Evaporateur	22	64	Cuivre/inox
	Condenseur	3.5	1502	Cuivre
	Ligne liquide	3	328	CuproNickel
	Ligne vapeur	3	567	CuproNickel
Boucle secondaire	Evaporateur	22	64	Cuivre/inox
	Condenseur	3.5	528	Cuivre
	Réservoir froid	19	58	Cuivre
	Ligne liquide	3	330	CuproNickel
	Ligne vapeur	3	474	CuproNickel

Tableau 1 : Géométrie du CLHP

## 2.4. Mèche capillaire

La mèche capillaire utilisée possède un rayon moyen de pore  $\bar{r}_{Géom}$  de l'ordre de  $7\mu\text{m}$  (valeur donnée par le fabricant). La perméabilité  $K$  de la mèche capillaire et son rayon de Laplace  $r_{Laplace}$ , caractéristique de la pression capillaire, sont déterminés expérimentalement à température ambiante respectivement par mesure de perte de charge en régime stationnaire et par imprégnation de liquide (éthanol et huile silicone) en régime transitoire. Cette dernière méthode, schématisée sur la Figure 3, utilise la loi de Washburn. En effet, l'égalité de la perte de pression dues aux frottements visqueux  $\Delta P_{Frottement} = \frac{\mu H}{K} \frac{dH}{dt}$  et de la pression capillaire

$\Delta P_{Capillaire} = \frac{2\sigma}{r_{Laplace}}$  permet de déduire une loi d'évolution temporelle de la hauteur  $H$  du front d'imprégnation

$$\frac{d(H^2)}{dt} = \frac{4K}{r_{Laplace}} \frac{\sigma}{\mu} \quad (1)$$

La mesure de l'évolution temporelle de la masse de liquide imprégné permet de calculer très facilement la hauteur  $H$  et ainsi de déduire à l'aide de l'équation (1) le rayon de Laplace ( $r_{Laplace} = 13\mu\text{m}$ ), connaissant les propriétés des fluides utilisés.

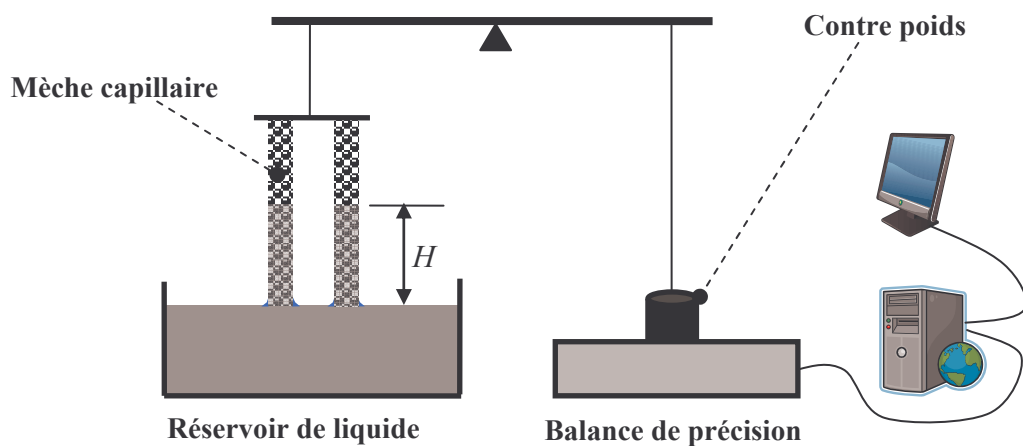


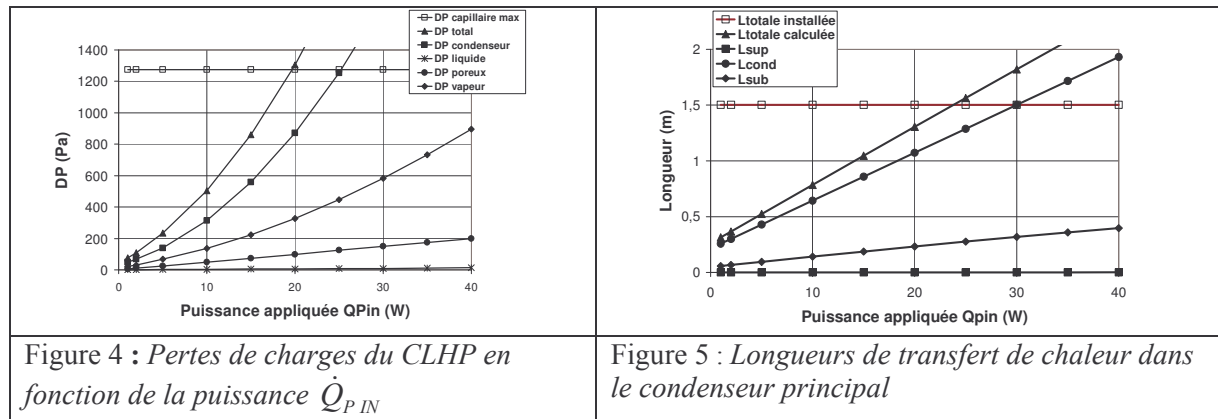
Figure 3 : Dispositif expérimental utilisé pour les mesures d'imprégnation

## 2.5. Limites de fonctionnement

Au fur et à mesure que la puissance est augmentée, les pertes de pression le long de la boucle sont de plus en plus importantes et doivent être compensées par une pression capillaires toujours plus grande, ce jusqu'à atteindre la pression capillaire maximum ( $\Delta P_{Cap Max} = \frac{2\sigma}{r_{Laplace}}$ ) soit environ 13 mbar à 80K. Pour la géométrie adoptée (cf §2.3), il existe

donc une valeur limite de puissance. La Figure 4 présente l'ensemble des pertes de charge de la boucle calculées avec les modèles de la littérature comparées à la pression capillaire maximum. La limite de fonctionnement se situe aux environs de 20W. Par ailleurs, il apparaît que l'essentiel des pertes de charge ne se situe pas dans la mèche capillaire (supposée totalement gorgée de liquide), mais dans le condenseur qui est majoritairement diphasique

(Figure 5). Ce résultat montre l'importance pour le dimensionnement du modèle de frottement diphasique utilisé



Il existe bien évidemment une autre limite de fonctionnement, celle de l'ébullition dans la mèche capillaire [6]. Elle conduit à une augmentation significative des pertes de charge et finalement à un désamorçage du CLHP et ne peut être déterminée qu'expérimentalement.

### 2.6. Condenseur principal

Le condenseur comprend trois parties distinctes dont les longueurs dépendent des transferts de chaleur entre la paroi à température du plan froid  $T_F$  et le fluide dont la température évolue entre  $T_V$  (vapeur surchauffée) et  $T_L$  (liquide sous refroidi). Le champ de températures de fluide et de paroi étant connu (cf §2.2), les modèles de transfert de chaleur de la littérature permettent le calcul des surfaces d'échange et donc des longueurs de tuyauterie nécessaires (Figure 5). La limite de fonctionnement se situe aux environ de 23W. Par ailleurs, il apparaît que le condenser contient essentiellement du fluide diphasique, ce qui démontre l'importance du modèle de transfert de chaleur en condensation dans le dimensionnement.

### 3. Dispositif expérimental et instrumentation

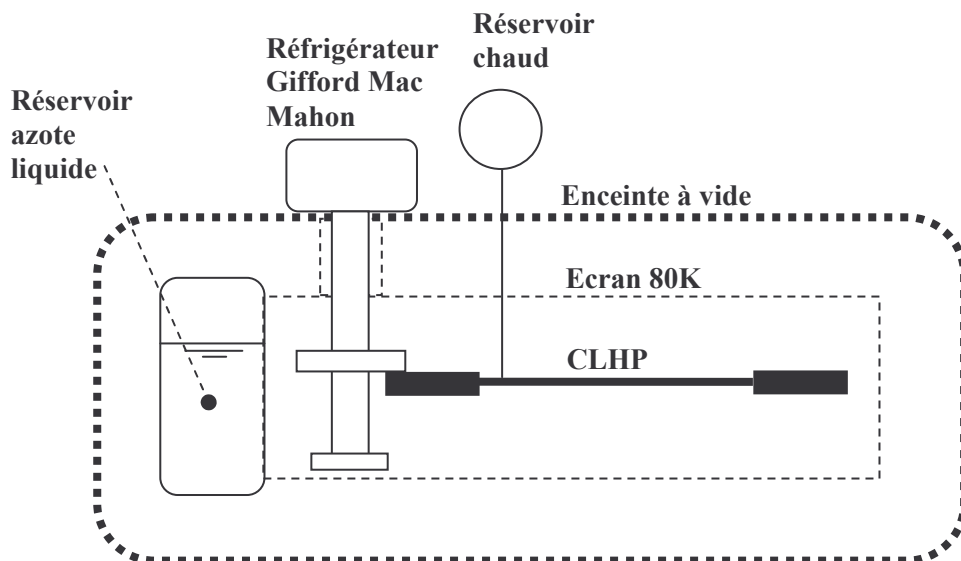


Figure 6 : Cryostat dédié aux tests du CLHP

Un cryostat dédié (Figure 6) a été construit pour mener le programme expérimental d'évaluation du CLHP. Un réfrigérateur Mac Mahon est utilisé comme source froide pour réguler la température du plan froid des condenseurs. Le CLHP est placé dans une enceinte à vide munie d'un écran 80K refroidi à l'azote liquide pour limiter à leur strict minimum les charges thermiques parasites. Le réservoir chaud est placé à l'extérieur de l'enceinte. Une quinzaine de sondes platine Pt100 sont placées sur les parois externes des parties froides et permettent de mesurer le champ de température. Les chauffages électriques imposant les puissances sur l'évaporateur principal et secondaire sont du type feuillard afin de répartir la chaleur sur la surface extérieure. Enfin, la partie centrale liquide de l'évaporateur principal est instrumenté pour détecter l'ébullition du liquide dans cette zone. Il est équipé d'une part de deux thermomètres, mais surtout d'un détecteur de taux de vide capacitif [7]. Ce dernier capteur, sensible à la densité du fluide en contact, permet grâce à un étalonnage « tout vapeur » et « tout liquide » de déduire la densité moyenne du mélange liquide vapeur situé au voisinage du capteur et donc l'accès au taux de présence de vapeur.

#### 4. Conclusion

On présente les principes d'un premier prototype de boucle fluide cryogénique à pompage capillaire développé au CEA-SBT. Par rapport au concept existant à température ambiante, ce concept se caractérise par l'ajout d'un réservoir chaud et d'un circuit secondaire nécessaires pour le refroidissement et l'amorçage de la boucle principale. Le dimensionnement présenté est effectué pour une puissance de 10W à une température de 80K. Il montre en particulier l'importance des transferts de chaleur et des frottements des écoulements diphasiques circulant dans le condenseur principal. Un cryostat dédié a été construit pour l'évaluation de ce prototype équipé d'une instrumentation spécifique qui permet la détection de la vaporisation du liquide au sein de l'évaporateur principal.

#### Références

- [1] D. Bugby, T. Davis, J. Ku., Glaister, Development of advanced cryogenic integration solutions, *Proc. 10th Cyocoolers Conf.*(1999), pp. 671-687
- [2] T.T. Hoang, D. Khruslatev, J. Ku, Cryogenic advanced loop heat pipe in temperature range of 20-30K, *Proc. 12th International heat pipe conference*, (2002), pp. 201-205
- [3] J. Yun, L. Crawford, Development of a cryogenic loop heat pipe (CLHP) for passive optical bench cooling applications, *Proc 32nd International Conference on Environmental Systems (2002)*
- [4] T.T. Hoang, J. Ku, Large area cryo cooling for far infrared telescopes, *Proc. SPIE* (2003), vol 5172, pp. 77-85
- [5] D. Khruslatev, Cryogenic loop heat pipes as flexible thermal links for cryocoolers, *Proc. 12th Cyocoolers Conf*, pp. 709-716
- [6] S. Launay, V. Sartre, J. Bonjour, Parametric analysis of loop heat pipe operation: a literature review, *International Journal of Thermal Science* 46 (2007), pp. 621-636
- [7] P. Thibault et al., On the design of capacitive sensors using flexible electrodes for multipurpose measurements, *Reviw of Scientific Instruments* 78, 043903 (2007)

#### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier David Garcia pour sa contribution à la conception du cryostat et du prototype