# Propriétés thermiques du cryostat du banc de test CCD

Claire Juramy

22 juin 2004

Les résultats présentés dans ce document proviennent d'une série d'expériences réalisées à partir de janvier 2004 sur le banc de test CCD. Entre les deux séries de mesures, des modifications ont été apportées aux liens entre les différents éléments (serpentin, doigt froid et plan focal) pour améliorer leur conductivité thermique. Les expériences ont permis de mettre en évidence deux régimes de refroidissement du cryostat par l'azote liquide, et d'évaluer numériquement les quantités de chaleur en jeu et l'impact de la résistance chauffante.

## 1 Vitesse de refroidissement et températures à l'équilibre

La figure 1 à gauche montre la descente en température mesurée en différents points du système lorsque le débit gazeux en sortie du cryostat est maintenu à 3 litres par minute (LPM). La figure de droite montre la baisse de température liée à l'augmentation du débit de 3 à 5 LPM.

On en tire des valeurs à l'équilibre aux trois positions pour trois configurations : 3 LPM et 5 LPM avec un dewar suffisamment rempli, et 5 LPM en régime "gazeux" (voir section suivante). On peut noter que le premier et le troisième régime aboutissent à des valeurs voisines. De même, l'évolution des températures enregistrées pendant les expériences de février a permis de déterminer les températures atteintes à l'équilibre pour différents débits (toujours avec un dewar bien rempli).

| Position | Avant modification | | | Après modification | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 3 LPM | 5 LPM (l) | 5 LPM (g) | 3 LPM | 4 LPM | 4,5 LPM | 5 LPM |
| Serpentin | 155 | 93 | 149 | 140 | 130 | 116 | 95 |
| Doigt Froid | 210 | 167 | 202 | 184 | 178 | 170 | 148 |
| Plan focal | 257 | 250 | 268 | 251 | 245 | 240 | 233 |

TAB. 1 – Tableau récapitulatif des températures (K) atteintes pour différents régimes.

En ce qui concerne le régime transitoire, le serpentin suit une loi exponentielle simple après un départ amorti pendant quelques minutes, avec un temps caractéristique de 40 minutes pour le premier graphe et de 15 minutes pour le deuxième. Une autre donnée intéressante est la pente maximale de la température du doigt froid : elle de l'ordre de 0.7 degré par minute dans les deux cas.

Après modification du montage, les temps caractéristiques mesurés sont 34 minutes pour un débit de 3 LPM et d'environ 6 minutes pour le passage à 5 LPM. La vitesse de refroidissement du doigt froid à 3 LPM est approximativement 1,3 degré par minute.

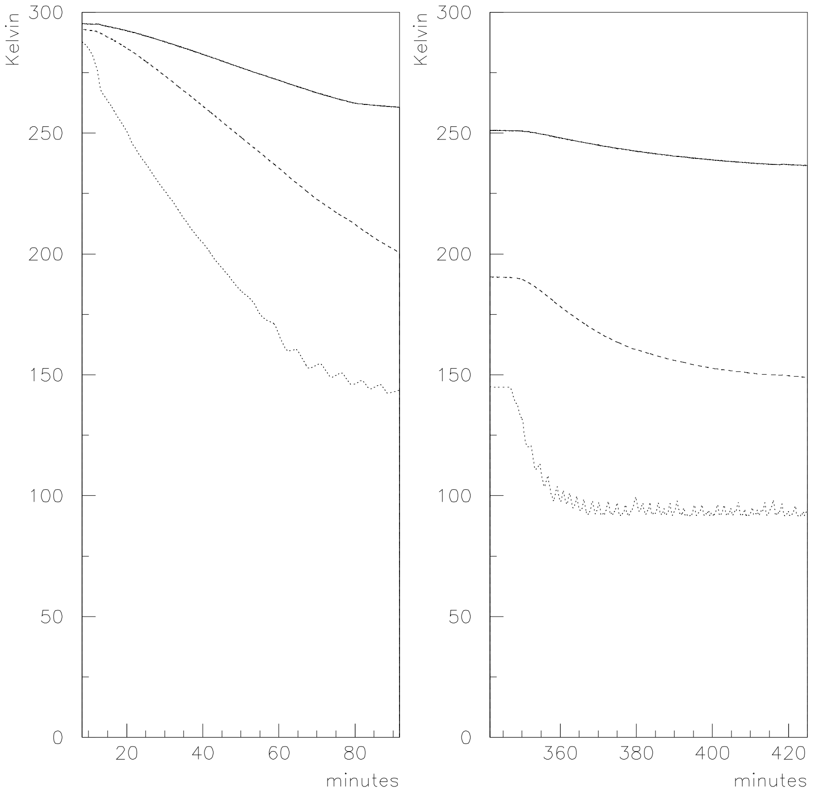


FIG. 1 – Evolution de la température du plan des photodiodes (ligne continue), du doigt froid (tirets) et du serpentin (pointillés), lorsque le débit de gaz passe est maintenu à 3 LPM (à gauche) puis porté à 5 LPM (à droite), après modification des liens thermiques. Le refroidissement rapide du serpentin au début de la première courbe correspond à un emballement du débit à la mise en route.

## 2 Deux régimes de fonctionnement

Les mesures de température au niveau du serpentin ont mis en évidence deux régimes de fonctionnement du refroidissement (voir figure 2) :

1. Dans le cas du haut, les fluctuations de température sont cycliques, et leur amplitude atteint plusieurs degrés. Cela correspond à un régime où l'azote liquide provenant du dewar atteint l'intérieur du cryostat. On peut expliquer ainsi l'évolution cyclique de la température : le liquide se réchauffe dans le serpentin jusqu'au point d'ébullition (refroidissement maximal), la vaporisation fait refluer le liquide car le débit en sortie est fixé (remontée de température), puis le liquide réoccupe la portion du serpentin du côté du dewar par gravité (redescente de la température). Les fluctuations de température du serpentin sont très amorties par le système : la température du doigt froid n'est pas affectée (voir figure 1).
2. Dans le deuxième cas, les fluctuations de température sont négligeables et, à débit de sortie constant, le refroidissement est moindre (voir tableau 1). Il n'y a pas d'azote liquide qui entre dans le cryostat, le refroidissement se fait par transfert de chaleur au flux de gaz froid qui parcourt le serpentin.

Le fait que le système suive l'un ou l'autre de ces régimes dépend du débit, mais aussi de la hauteur de liquide dans le dewar : si le liquide est trop bas, il s'évapore dans la canne, perdant ainsi une partie de son pouvoir refroidissant au niveau du dewar.

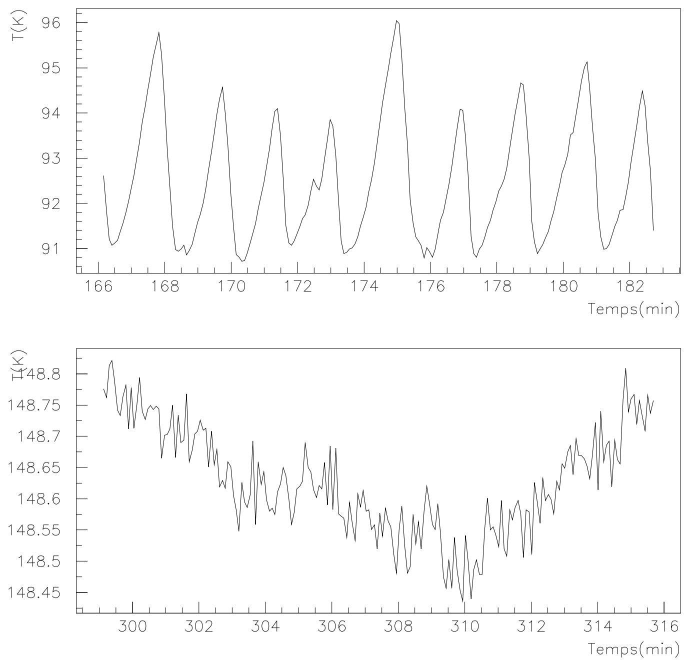


FIG. 2 – Evolution caractéristique de la température du serpentin dans les deux régimes de fonctionnement.

## 3 Ordres de grandeurs des puissances en jeu

Le tableau 3 récapitule les données utiles pour les applications numériques.

| | |
|---|---|
| Température de vaporisation de $N_2$ | 77,35 K |
| Densité de $N_2$ (liquide @77,35 K) | 804 $g.L^{-1}$ |
| Densité de $N_2$ (gaz @77,35 K) | 4,613 $g.L^{-1}$ |
| Densité de $N_2$ (gaz @273,15 K) | 1,251 $g.L^{-1}$ |
| Chaleur latente de vaporisation de $N_2$ | 199,2 $J.g^{-1}$ |
| Capacité thermique massique de $N_2$ (gaz @273 K, 1 bar) | 1,042 $J.K^{-1}.g^{-1}$ |
| Capacité thermique massique de $N_2$ (gaz @77,35 K, 1 bar) | 1,039 $J.K^{-1}.g^{-1}$ |
| Capacité thermique massique de $N_2$ (liquide @77,35 K, 1 bar) | 2,03 $J.K^{-1}.g^{-1}$ |
| Conductivité thermique du cuivre @100K | 470 $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| Conductivité thermique du cuivre @140K | 420 $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| Conductivité thermique du cuivre @300K | 400 $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| Capacité thermique du cuivre @100K | 0,232 $J.g^{-1}.K^{-1}$ |
| Capacité thermique du cuivre @140K | 0,313 $J.g^{-1}.K^{-1}$ |
| Capacité thermique du cuivre @300K | 0,386 $J.g^{-1}.K^{-1}$ |
| Emissivité de l'acier inoxydable 18-8 @300K | 0,20 |
| Emissivité du cuivre (poli mécanique) @80K | 0,06 |

TAB. 2 – Données thermodynamiques pour $N_2$.(Sources : Handbook of Physics and Chemistry et document Ecole Cryogénie)

De ces données on peut tirer quelques ordres de grandeurs significatifs :

– La vaporisation d'un centilitre d'azote liquide donne un volume d'environ 1,75 L d'azote gazeux à la température de vaporisation, et consomme 1600 J.
– Un débit gazeux de 5 LPM à température ambiante correspond à 1,35 LPM à 78 K (6,3 g d'azote par minute), soit environ 21 W de puissance absorbée par la vaporisation.
– Avec ce débit de sortie, le gaz absorbe 1 W par 10 K d'élévation de température.
– La puissance absorbée au total pour un débit de sortie de 5 LPM est donc d'environ 40 W (soit moitié par vaporisation et moitié par élévation de température).

Ceci donne une limite supérieure, et un ordre de grandeur, de la puissance disponible pour le refroidissement du système à l'intérieur du cryostat. La question de savoir quelle proportion de ces 40 W contribue effectivement au refroidissement reste par contre ouverte.

On cherche à refroidir l'ensemble formé par le serpentin, la plaque de liaison, les deux tresses et le bloc du doigt froid, le tout en cuivre (on oublie provisoirement le plan des photodiodes). Il nous faut maintenant évaluer la puissance rayonnée par les parois du cryostat et reçue par cet ensemble, en tenant compte des émissivités relatives de ces deux surfaces. Si on note les températures $T$, les émissivités $\epsilon$, $d$ la distance et $S$ les surfaces présentées, la puissance transférée par rayonnement est :

$$P_{0\to 1} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_0} + \frac{1}{\epsilon_1} - 1} \cdot \frac{S_0 \cdot S_1}{4\pi d^2} \, \sigma \left(T_0^4 - T_1^4\right) \tag{1}$$

Avec des valeurs raisonnables ($S_0 = 0,5\ m^2$,$S_1 = 200\ cm^2$,$d = 15\ cm$,$T_0 = 300\ K$,$T_1 = 100\ K$), on obtient un ordre de grandeur de $1\ W$ pour la puissance reçue par rayonnement. L'incertitude sur cette valeur est élevée, car elle dépend de nombreux facteurs difficiles à évaluer. Il faudrait aussi y ajouter le refroidissement nécessaire pour le support du CCD et le plan des photdiodes.

# 4 Modèle simple du refroidissement

Le modèle le plus simple qu'on puisse faire de l'ensemble du système est une succession de réservoirs thermiques (possédant chacun une certaine capacité thermique), relié entre eux par des liens thermiques (caractérisés par leur conductiblité). On pourrait éventuellement y ajouter l'effet de pertes par rayonnement, mais le facteur en $T^4$ complique la résolution des équations. En les négligeant, on obtient un système analogue à un enchaînement de cellules résistance + condensateur, produisant un circuit passe-bas dont l'ordre est incrémenté de 1 à chaque maillon. Cependant, dans le cas du cryostat, ce système est alimenté par les deux extrémités : une source de froid d'un côté, le flot d'azote liquide, et de l'autre coté les parois du cryostat qui sont la source chaude.

# 5 Effet de la résistance chauffante du doigt froid

La résistance chauffante, placée sur le doigt froid à l'opposé de la résistance de mesure, vaut 100 Ω. Les tensions imposées lors du test figure 5 correspondent donc à des puissances de 0,25 et 1 W respectivement. Pour une puissance de 1 W, la température du doigt froid s'élève d'environ 15 K dans ces conditions. Ce test de réchauffement nous donne donc une évaluation indépendante de la puissance consommée par le refroidissement : environ 10 W pour descendre de 150 K.

# 6 Protocole de refroidissement

Lorsque le CCD est placé dans le cryostat, la vitesse de changement de température ne doit pas dépasser 1 degré K par minute. Le calcul de la vitesse de refroidissement du doigt froid a été ajouté au programme de suivi des températures et de la pression, ainsi qu'une alarme pour signaler tout dépassement. Les règles suivantes, inspirées des expériences précédentes et vérifiées empiriquement, permettent de procéder au refroidissement du cryostat à une vitesse raisonnable tout en restant largement dans la gamme de sécurité :

– Lorsque le cryostat plein est mis en communication avec le système de refroidissement, le débit de sortie ne doit pas dépasser **2 LPM** pendant toute la descente. Ce débit met environ 20 minutes à se stabiliser, le temps que la pression monte dans le cryostat.
– Lorsque la température du serpentin commence à s'approcher de l'équilibre à 2 LPM, on peut augmenter le débit par **incréments de 0,5 LPM** au maximum.

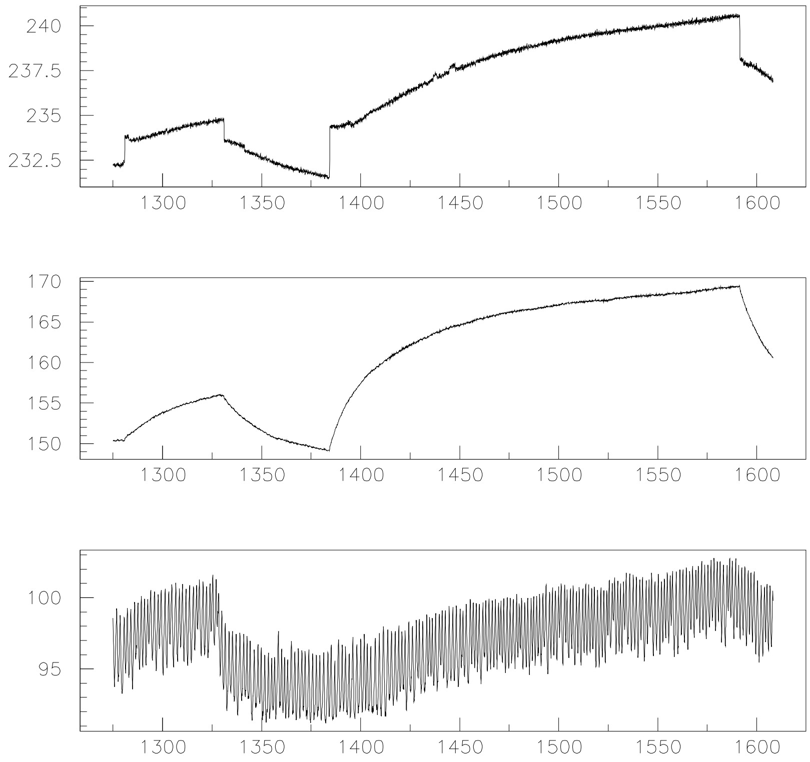


FIG. 3 – Mesure de température lorsque la résistance chauffante est alimentée par un créneau de 5 V puis un de 10 V. Les créneaux de la mesure au niveau du plan des photodiodes sont un artefact dû à l'alimentation de la résistance chauffante par l'intermédiaire de la carte d'acquisition.