



**HAL**  
open science

## Experiences d'irradiation a basse temperature des thermometres du LHC

J F. Amand, P. Bujard, C. Joly, T. Junquera, J P. Thermeau

► **To cite this version:**

J F. Amand, P. Bujard, C. Joly, T. Junquera, J P. Thermeau. Experiences d'irradiation a basse temperature des thermometres du LHC. 1998, pp.1-37. in2p3-00014397

**HAL Id: in2p3-00014397**

**<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00014397>**

Submitted on 2 Mar 1999

**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.

CERN LIBRARIES, GENEVA



SCAN-9803001

23 Janvier 1998

IPNO 98 - 01

**« Expériences d'irradiation à basse température  
des thermomètres du LHC »**

810 950

**J.F. AMAND, P. BUJARD, C. JOLY,  
T. JUNQUERA, J.P. THERMEAU**

## Abstract

This paper presents the advancement of a program being carried out in view of selecting the cryogenic temperature sensors to be used in the CERN LHC collider. About 10,000 sensors will be installed around the 26.6 km LHC ring, and most of them will be exposed to high radiation doses during the accelerator lifetime. During the four irradiation experiment of 1997, 180 thermometers from 6 types have been exposed to high neutron fluences ( $> 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>) at the ISN (Grenoble, France) Cryogenic Irradiation Test Facility. A cryostat is placed in a shielded irradiation vault where a 20MeV deuterons beam hits a thin Beryllium target, resulting in a well collimated and intense neutron beam. The characteristics of the cryogenic system, the acquisition and the irradiation facility are described. The main interest of this set-up is its ability to simulate the whole life of the LHC thermometers : same total neutron fluence, irradiation at superfluid Helium temperature, on-line acquisition of sensors resistance, several warm-up cycles. The resistance shifts of the different thermometer are presented.

Ce document présente les progrès d'un programme visant à sélectionner les capteurs de température cryogénique du collisionneur LHC du CERN. Environ 10.000 capteurs seront installés dans les 26,6 km de l'anneau du LHC, et la plupart d'entre eux seront exposés à des flux de neutrons élevés pendant la durée de vie de l'accélérateur. Au cours des quatre expériences d'irradiation de 1997, 180 thermomètres de six types ont été exposés à des doses de neutrons élevées ( $> 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>) dans la station de test d'irradiation cryogénique de l'ISN (Grenoble, France). Un cryostat est placé dans une salle d'irradiation blindé, où un faisceau de deutons de 20 MeV bombarde une cible mince de Béryllium. La réaction produit un faisceau intense de neutrons, bien collimaté. Les caractéristiques de l'installation cryogénique, de l'acquisition et de la station d'irradiation sont décrites. Le principal intérêt de ce montage est sa capacité à simuler la vie entière d'un thermomètre du LHC : même dose totale en neutrons, irradiation à température de l'Hélium superfluide, acquisition en ligne de la résistance des capteurs, plusieurs cycles de réchauffements. Les variations de résistance des différents thermomètres sont présentées.

# Sommaire

<b>Introduction</b> .....	Page 5
<b>1 - Description des expériences</b> .....	Page 7
A - capteurs testés.....	Page 7
B - Caractéristiques du dispositif d'irradiation.....	Page 10
C - Caractéristiques de l'installation cryogénique.....	Page 14
D - Acquisition des données et bruit.....	Page 14
<b>2 - Résultats</b> .....	Page 18
A - Principe du dépouillement.....	Page 18
B - Irradiation de thermomètres Platine.....	Page 19
C - Irradiation de thermomètres Rhodium-Fer.....	Page 21
D - Irradiation de thermomètres TVO.....	Page 23
E - Irradiation de thermomètres Allen-Bradley.....	Page 25
F - Irradiation de thermomètres Germanium.....	Page 27
G - Irradiation de thermomètres Cernox®.....	Page 30
<b>Conclusions</b> .....	Page 35
Références.....	Page 36
Index des figures et des tables.....	Page 37

## Introduction

Le futur collisionneur LHC du CERN sera composé de 27 km d'éléments supraconducteurs, fonctionnant en Hélium superfluide à une température comprise entre 1,8K et 1,9K. La température doit être connue dans l'ensemble de la machine avec une précision de 5 mK. Pour cela, 10.000 thermomètres seront calibrés à Orsay avant d'être installés dans la machine.

Les expériences d'irradiations effectuées sur le cyclotron SARA de l'ISN Grenoble font partie de la phase de sélection des capteurs: on attend des thermomètres qu'ils soient suffisamment sensibles et que leur caractéristique ne change pas pendant les 10 ans de fonctionnements prévus pour la machine.

Les doses cumulées aux emplacements prévus pour les thermomètres pourront atteindre jusqu'à  $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup> (  $2 \cdot 10^4$  Gy ) [1,2]. Il est donc important de tester la tenue aux rayonnements des thermomètres candidats dans les conditions les plus proches possibles de celles du LHC:

- Même dose cumulée ( atteinte toutefois en une semaine au lieu de 10 ans )
- Fonctionnement en Hélium superfluide
- Cycle thermique au milieu de l'irradiation ( Octobre 1997 )
- Acquisition des valeurs des résistances pendant l'irradiation

Quatre expériences ont été réalisées en 1997 ( Mai 97 à 4,2K, deux irradiations en Septembre 97 à 2,1K et une irradiation en Octobre 97 à 1,8K ) après une première irradiation effectuée en Octobre 96 ( en Argon liquide - T<sub>bain</sub>=86K ).

# 1 - Description des expériences

## A - Capteurs testés

Les thermomètres testés sont des capteurs résistifs: la valeur de la résistance varie avec la température. Pour utiliser ces composants comme thermomètres, une calibration individuelle est nécessaire. Au cours des expériences d'irradiation de 1997, six types de capteurs ont été irradiés:

- CERNOX: CERamic OXyNitride: dépôt d'oxyde de Zirconium. Comportement de type semi conducteur. ( LakeShore Cryogenics, USA )
- TVO: thermomètre résistif en Carbone: « feuilles » d'un mélange céramique-carbone ( 3 à 5 % de carbone ) ( Joint Institut for Nuclear Research, Russie )
- Allen-Bradley: résistance électronique; particules de carbone agglomérées, liées par une résine phénolique ( Allen-Bradley, USA )
- Rhodium Fer : alliage métallique, en couche mince ( sur photo ) ou bobiné. ( Couche mince: Oxford Instruments, GB )
- Germanium : couche mince, de deux type: 1B et 1C. Le modèle 1C ( voir photo ) est plus compact mais moins sensible que le type 1B. ( Institute of Semiconductors Physics of the National Academy of Science of Ukraine - Microsensor Co Ltd )
- Platine: fil bobiné encapsulé dans du verre ou de la céramique.

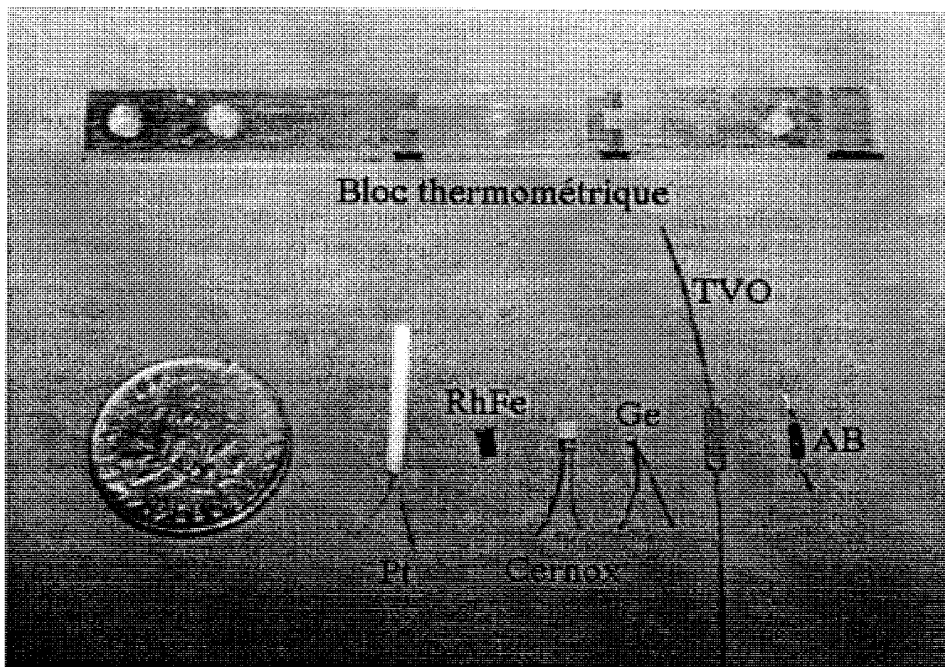


Figure 1 - Photo des thermomètres

Dans le LHC, les capteurs seront montés sur des blocs thermométrique qui assureront la thermalisation. La plupart des thermomètres irradiés à Grenoble l'ont été dans le liquide, sans le bloc. De plus, lors de chaque expérience, six blocs thermométriques munis de capteurs étaient installés dans le vide d'isolement, sur la paroi extérieure de l'enceinte froide.

Capteur	R@1,8K	dR/dT@1,8K	R@4,2K	dR/dT@4,2K
Cernox	15000Ω	-15000 Ω /K	3000 Ω	-1300 Ω /K
TVO	5500 Ω	-2800 Ω/K	3000 Ω	-600 Ω /K
Allen-Bradley	10000 Ω	-15000 Ω /K	1000 Ω	-400 Ω /K
Ge 1B	10000 Ω	-10000 Ω /K	3000 Ω	-800 Ω/K
Ge 1C	2000 Ω	-80 Ω /K	1600 Ω	-80 Ω /K
RhFe couche mince	13 Ω	0,8 Ω /K	16 Ω	0,6 Ω /K
RhFe bobinée	1,3 Ω	0,13 Ω /K	1,7 Ω	0,17 Ω /K
Platine	0,15 Ω	0,0012 Ω/K	0,15 Ω	0,0012 Ω

Table 1 - Caractéristiques des thermomètres étudiés

Remarques:

- Les valeurs de la table 1 sont des valeurs typiques, mesurées lors de nos calibrations.

-les platines ont une sensibilité extrêmement faible, qui les exclut à priori comme thermomètre dans la gamme 1,6K-4,2K. Ils sont toutefois présents dans l'expérience d'irradiation en tant que sonde témoin: la réponse du platine à l'irradiation est connue comme étant linéaire dans nos conditions d'expérimentation ( basse température, dose =  $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup> ).

Dans le même but, un échantillon de Fer-Bore est installé parmi les capteurs. Le Fer-Bore est un alliage amorphe, qui réagit très faiblement aux variations de température et aux irradiations. Les changements de résistance de cet échantillon permettent de détecter d'éventuels problèmes sur la chaîne de mesure ( bruit, dérive d'un appareil de mesure... ).

	Mai 97 4,2K	Septembre 97 2,1K	Octobre 1997 1,8K	Total
CERNOX	12	30	3	45
Allen-Bradley	12	15	4	31
TVO	10	16	6	32
Germanium	0	0	5	5
Platine	12	4	5	21
RhFe	0	22	24	46
				<b>180 capteurs</b>

Table 2 - Bilan des irradiations Hélium 1997

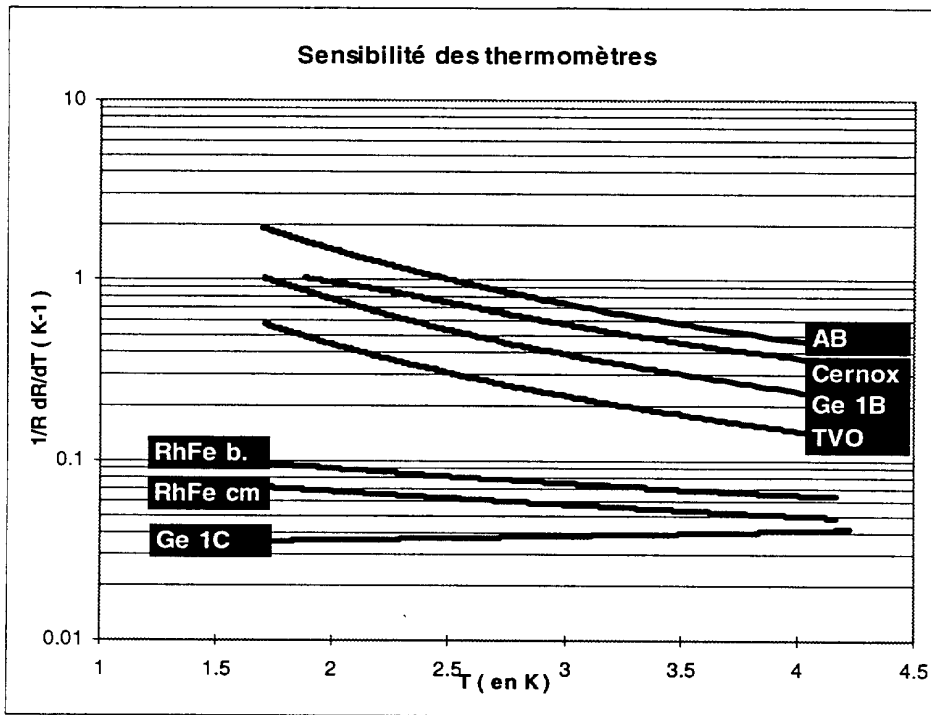


Figure 2 - Sensibilités relatives des différentes familles de capteur

En variation relatives, l'incertitude  $\sigma/u$  liée à la chaîne de mesure est de  $5 \cdot 10^{-5}$ . Nous pouvons donc estimer l'incertitude de la mesure de température pour les différents thermomètres:  $\Delta T = (\Delta u/u)/(1/R dR/dT)$

Thermomètre	$1/R dR/dT (K^{-1}) @ 1,8K$	$\Delta T @ 1,8K$
Cernox	1	$5 \cdot 10^{-2}$ mK
Allen-Bradley	1,5	$3 \cdot 10^{-2}$ mK
TVO	0,5	0,1 mK
Ge 1B	0,8	$6 \cdot 10^{-2}$ mK
Ge 1C	0,03	1,6 mK
RhFe bobinée	0,09	0,6 mK
RhFe c.m.	0,07	0,7 mK
Platine	$8 \cdot 10^{-4}$	60 mK

Table 3 - Précision des thermomètres

Remarques: La figure 2 donne des valeurs expérimentales, issues des calibrations effectuées avec le cryostat d'irradiation. Le  $\Delta T$  de la table 3 ne prend pas en compte les problèmes de stabilité à long terme des capteurs ou des appareils, ni l'incertitude sur la température de référence lors de la calibration des capteurs. Dans le cas de mesures absolues, l'incertitude de la chaîne de mesure  $\sigma/u$  est de  $5 \cdot 10^{-4}$ .



## B - Caractéristiques du dispositif d'irradiation

Les neutrons sont produits par la réaction  ${}^9\text{Be}(d,n){}^{10}\text{B}$ : un faisceau de deutons de 20 MeV et d'intensité comprise entre 5 et 7  $\mu\text{A}$  est dirigé sur une cible en Béryllium de 3 mm d'épaisseur.

Les irradiations ont été effectuées sur la voie H du cyclotron SARA de l'ISN Grenoble ( IN2P3 ).

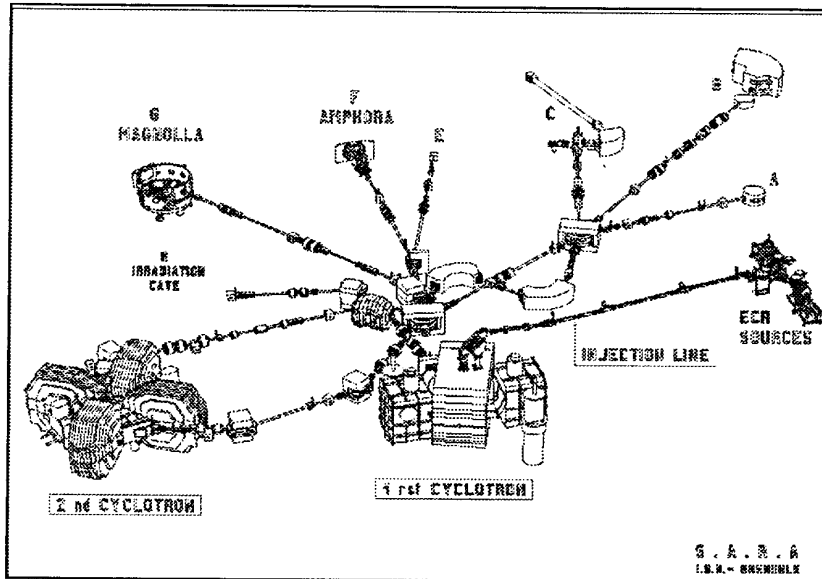


Figure 3 - Schéma de l'accélérateur SARA ( source ISN Grenoble )

Avec ce système, nous pouvons obtenir une dose totale de 4000 Gy en une journée d'irradiation avec un faisceau de deutons de 5  $\mu\text{A}$ . 80% de cette dose est due aux neutrons, ce qui représente un flux de  $2.10^{14}$   $\text{n}/\text{cm}^2$ . Pour les 10 ans de fonctionnement, la dose reçue par les thermomètres est estimée entre 100 Gy et 1000 Gy dans 95% de la machine, et jusqu'à dix fois plus dans certains secteurs de la machine, à proximité des points d'interaction. Chaque expérience d'irradiation dure donc entre 4 et 6 jours, avec comme objectif une dose totale moyenne de  $10^{15}$   $\text{n}/\text{cm}^2$ .

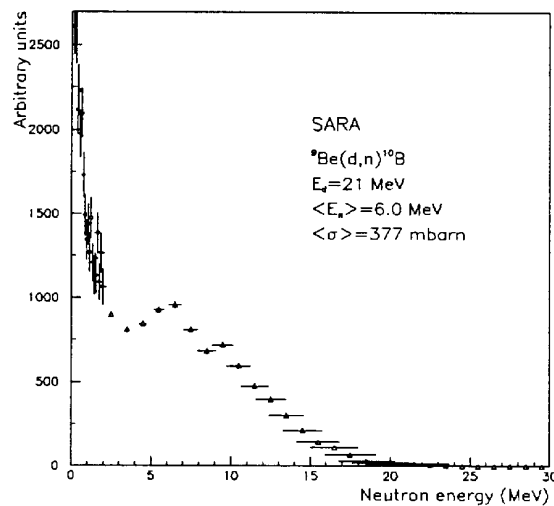


Figure 4 - Spectre en énergie des neutrons émis à  $0^\circ$  ( source J. Collot - ISN Grenoble )

Les thermomètres ( 48 capteurs dans le liquide à chaque irradiation ) sont placés à une distance comprise entre 8 et 11 cm de la cible Béryllium. ( voir schéma figure 5 et photo figure 6 )

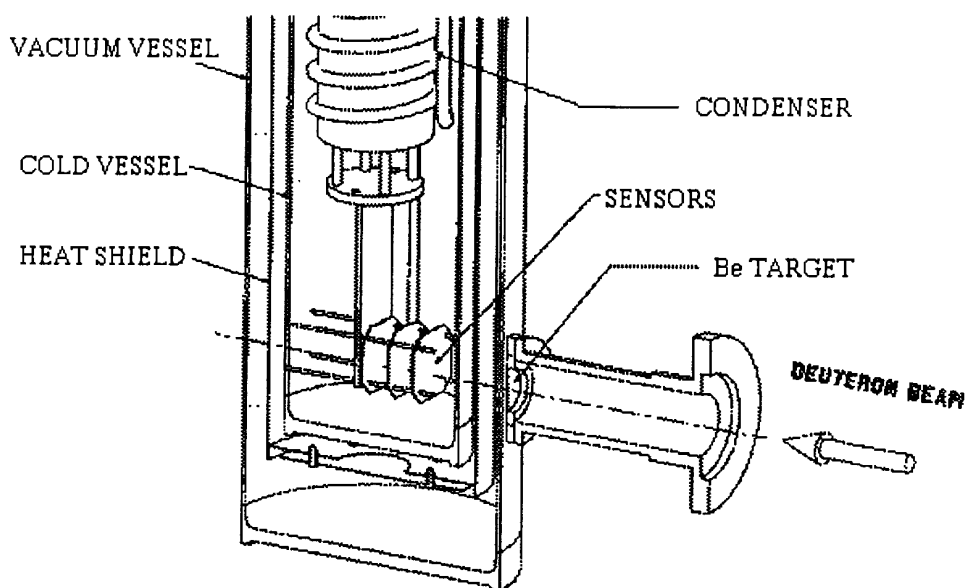


Figure 5 - Schéma du cryostat d'irradiation

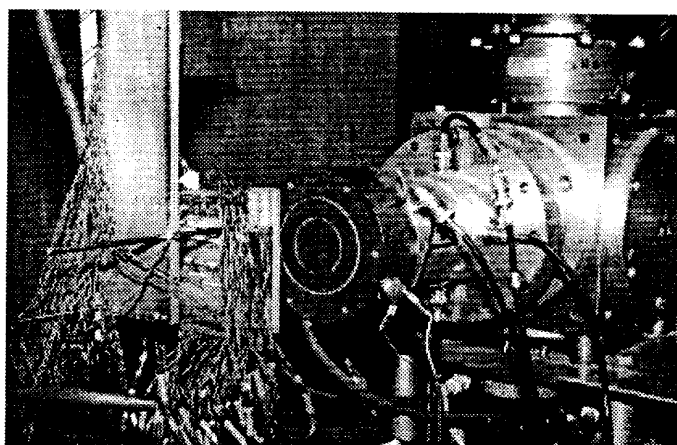


Figure 6 - Photo de la cible Be et des plaquettes

La photo représente une expérience d'irradiation en cours de montage ( les enceintes et les écrans du cryostat ne sont pas installés ). Au premier plan, les plaquettes avec les fils des thermomètres. En arrière plan, la cible Be à l'arrivée du faisceau. La distance entre la cible et la première plaquette est de 8cm.

La mesure de la dose au cours de l'expérience est déduite de deux mesures:  
 - une mesure locale: des pastilles de Nickel ( diamètre 4mm, épaisseur 0,125mm ) sont collées sur chaque thermomètre irradié. L'activation du Nickel 58 par les neutrons donne du Cobalt 58, un élément radioactif de 71 jours de demi-vie. Après l'expérience, on mesure l'activité des pastilles et on peut en déduire le flux de neutrons intégré. Cette méthode a une précision de 15%. La figure suivante donne un exemple de « carte de dose » pour l'expérience d'irradiation d'octobre 1997, pour une plaquette située à 8,5 cm de la cible Be.

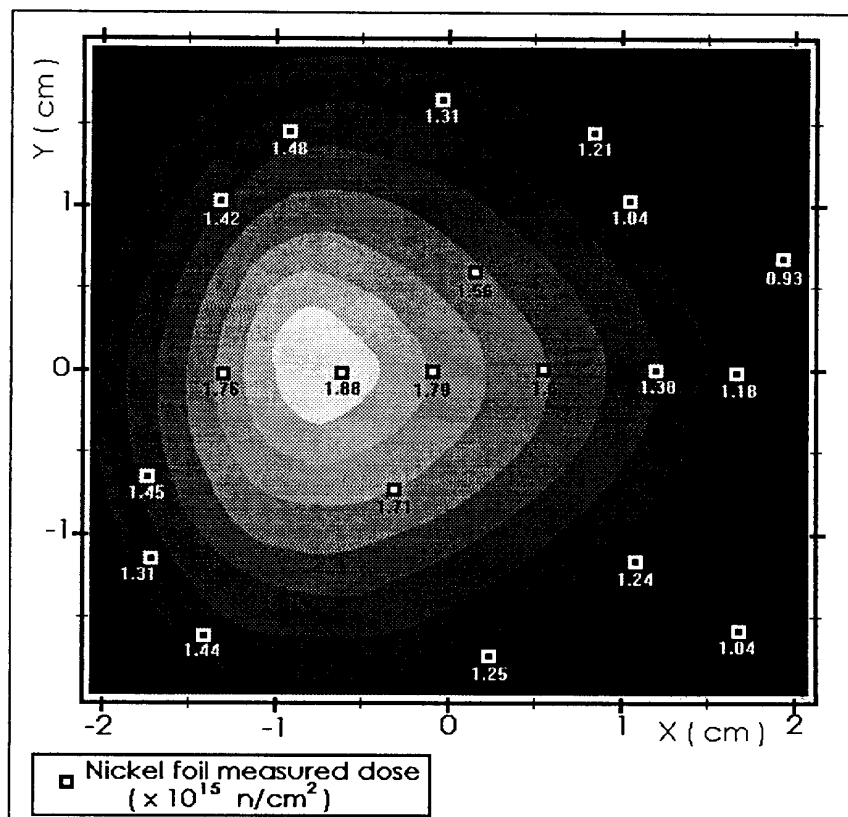


Figure 7 - Répartition de la dose mesurée ( oct. 97 )

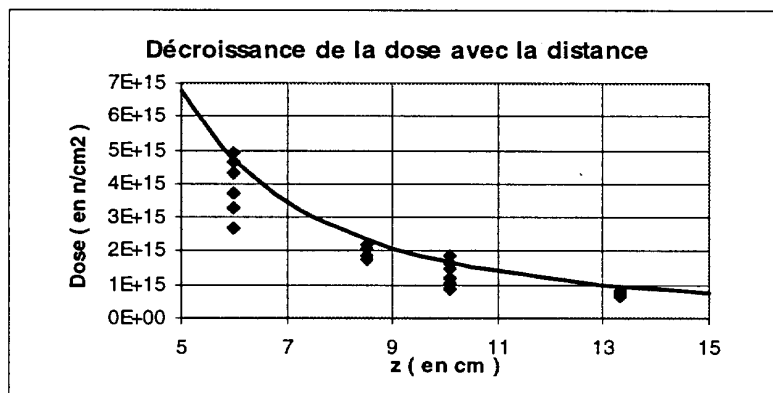


Figure 8 - Dose en fonction de la distance à la cible

Les points sont des mesures expérimentales de dose ( mai 97 ).La dose décroît selon une loi en 1/z<sup>2</sup> ( courbe continue ) avec z la distance entre le capteur et la cible Be. La dispersion des points de la figure 8 correspond à la répartition de la dose dans chaque plan ( voir figure 7 ).

- La seconde mesure de dose est la mesure du courant faisceau sur la cible Be. Il nous donne une mesure en continu de l'irradiation globale. On considère que le flux de neutrons est proportionnel à ce courant. On calcule la charge du faisceau sur la cible ( qui est l'intégration par rapport au temps de l'intensité faisceau ), et par une normalisation de cette courbe avec les doses mesurées par les pastilles Nickel, nous pouvons estimer la dose reçue par chaque capteur à tout moment.

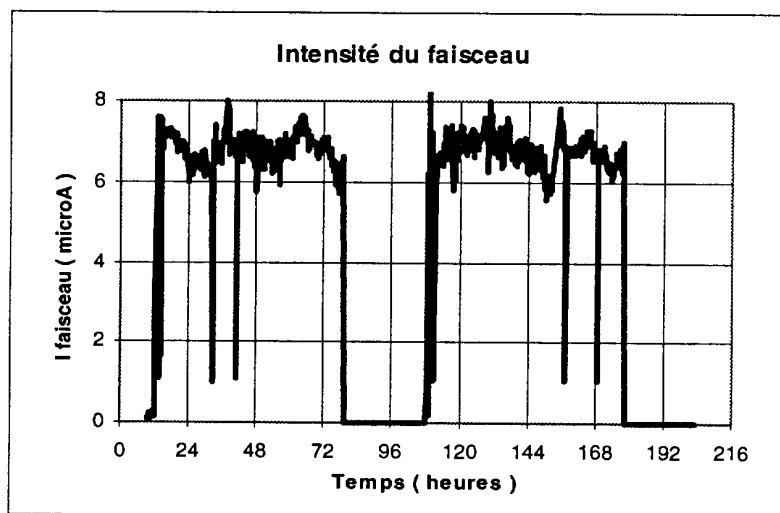


Figure 9 - Intensité faisceau

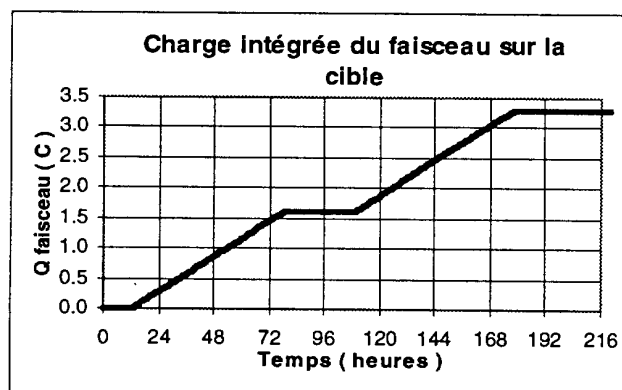


Figure 10 - Charge faisceau

L'estimation de la dose par normalisation de la charge du faisceau se justifie par la bonne stabilité du flux de neutrons: dans certaines expériences, des diodes étaient placées derrière le cryostat pour contrôler en continu la répartition du faisceau de neutrons. D'autre part, la variation de résistance des thermomètres platines est proportionnelle au flux de neutron. Expérimentalement, nous avons observé que leur variation est proportionnelle à la charge du faisceau. On peut donc en déduire que les flux de neutrons sont proportionnels à la charge du faisceau sur la cible.

## C - Caractéristiques de l'installation cryogénique

### Mesure de la température de référence

La température du bain d'Hélium est mesurée par un bulbe de pression: c'est un petit cylindre (1 cm<sup>3</sup>), rempli à moitié d'Hélium liquide quand la température est basse. Il est relié par un capillaire à un appareil de mesure de pression. La pression mesurée est la tension de vapeur, qui dépend de la température. ( voir figure 11 ). L'intérêt de l'utilisation de ce type de thermomètre dans une expérience d'irradiation est son insensibilité aux radiations: il n'est pas sujet aux dégradations par les neutrons, et étant constitué essentiellement d'Hélium ( comme son environnement extérieur ) il ne devrait pas subir de surchauffement dû au faisceau.

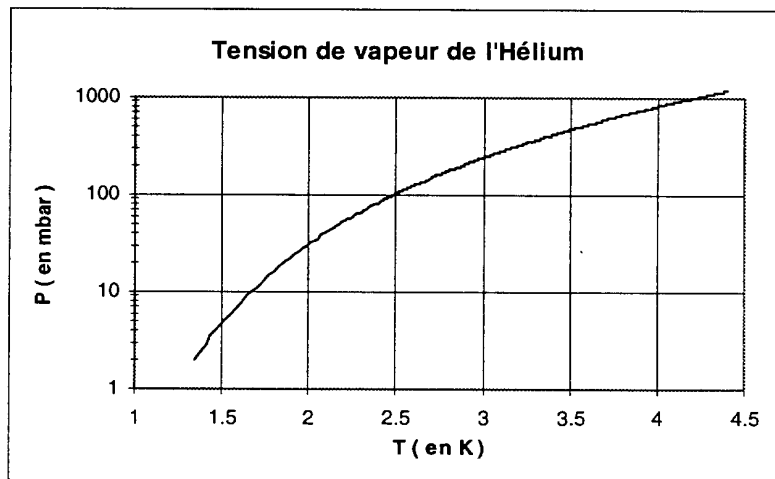


Figure 11 - Tension de vapeur de l'Hélium

Régulation de la température du bain:

Le tableau suivant résume les montages utilisés ainsi que leurs caractéristiques.

Expérience	Tconsigne	Régulation	Bruit thermique sur bulbe ( mesuré avec Baratron 1000 Torr )	Plage de température mesurée sur le bulbe (1000 Torr )	Dérive mesurée sur le bulbe ( 1000 Torr )
Mai 97	4,2 K	Pression atmosphérique	$\sigma_T = 0,25$ mK	4,195K - 4,21 K	1 mK/heure
Septembre 97	2,01 K	Vanne à membrane sur bain	$\sigma_T = 0,3$ mK	2,085K - 2,125K	1 mK/heure
Octobre 97	1,8 K	Vanne papillon sur bulbe (Baratron 100mBar, régulateur PID)	$\sigma_T = 0,05$ mK ( sans parasite ) $\sigma_T = 0,2$ mK(parasite)*	1,801K - 1,807K	0,1 mK/heure

Table 4 - Régulation de la température du bain

\* Bruit intermittent sur la mesure de pression

## Déroulement des expériences

Pour chaque expérience, nous avons effectué une calibration avant et après irradiation des capteurs avec le cryostat d'irradiation, et sans recuit.

**Expérience Mai 97:** la température de consigne est de 4,2K. Nous avons procédé à trois descentes en température: 1,8K ( un point ); 2,1K ( une heure ) et 3K ( dix heures ). La dose totale moyenne est de  $1,5 \cdot 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>. Tous les jours, nous arrêtons l'irradiation pendant une heure.

**Expériences Septembre 97:** Deux séances d'irradiation ( avec deux séries de capteurs irradiés ). La température de consigne est de 2,1K. Tous les jours, nous effectuons un remplissage du cryostat, se traduisant par une remontée de la température du bain à 4K. Pour ces deux irradiations, la dose totale moyenne est de  $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>. Tous les jours, arrêt faisceau d'une heure.

**Expérience Octobre 97:** irradiation à  $T_{\text{bain}}=1,8\text{K}$ . En milieu d'expérience, coupure du faisceau d'une journée, pendant laquelle nous avons effectué une calibration, un recuit à 300K et une deuxième calibration juste avant le retour du faisceau. Tous les jours, remplissage du cryostat ( remontée de  $T_{\text{bain}}$  à 4,2K ). Après la coupure définitive du faisceau, nous avons maintenu la température à 1,8K pendant une journée avant d'effectuer la calibration. Dose totale moyenne:  $10^{15}$  n/cm<sup>2</sup> ( divisée en deux irradiations ).

## D - Acquisition des données et bruits

Les résistances des thermomètres sont mesurées en « quatre fils », les tensions étant lues avec un courant positif et négatif. Selon les thermomètres, le courant d'alimentation est de 2μA, 10μA ou 1mA.

A chaque acquisition sont mesurés:

- 48 thermomètres dans le liquide
- 6 thermomètres dans le vide
- 6 thermomètres diagnostic dans le cryostat
  - Pour chaque lecture de tension sur un thermomètre, on effectue une mesure de la tension délivrée par la source en lisant la tension aux bornes d'une résistance de précision et de haute stabilité placée en série avec la source ( a partir de Septembre 97 ). En mai 97, la résistance de précision était assimilée à un thermomètre, et était mesurée une fois par scan.
- La valeur de la résistance de précision par le nanovoltmètre en mode ohm-mètre. ( Oct. 97 )
- La température à proximité de la résistance de précision avec un thermomètre Pt100 ( Oct. 97 )
- La pression du bulbe et du bain ( plusieurs fois par scan; en moyenne une mesure par minute )
  - La configuration de la mesure de pression a changé à chaque expérience, voire pendant les expériences. Toutefois, la température de référence est toujours déduite de la mesure de la pression sur un bulbe, effectué avec le même baratron MKS 1000 Torr.
- Les mesures de niveau dans le cryostat et dans la bouteille ( Mai 97 ): mesure en ligne abandonnée par la suite car perturbant le bain.
- 9 diodes pour la dosimétrie, alimentées en 20 mA, mesure en 4 fils. ( Mai et Sept. 97 )
- Le courant du faisceau sur la cible Béryllium

Chaque scan comprend entre 140 et 250 mesures, et dure entre 5 et 7 minutes.

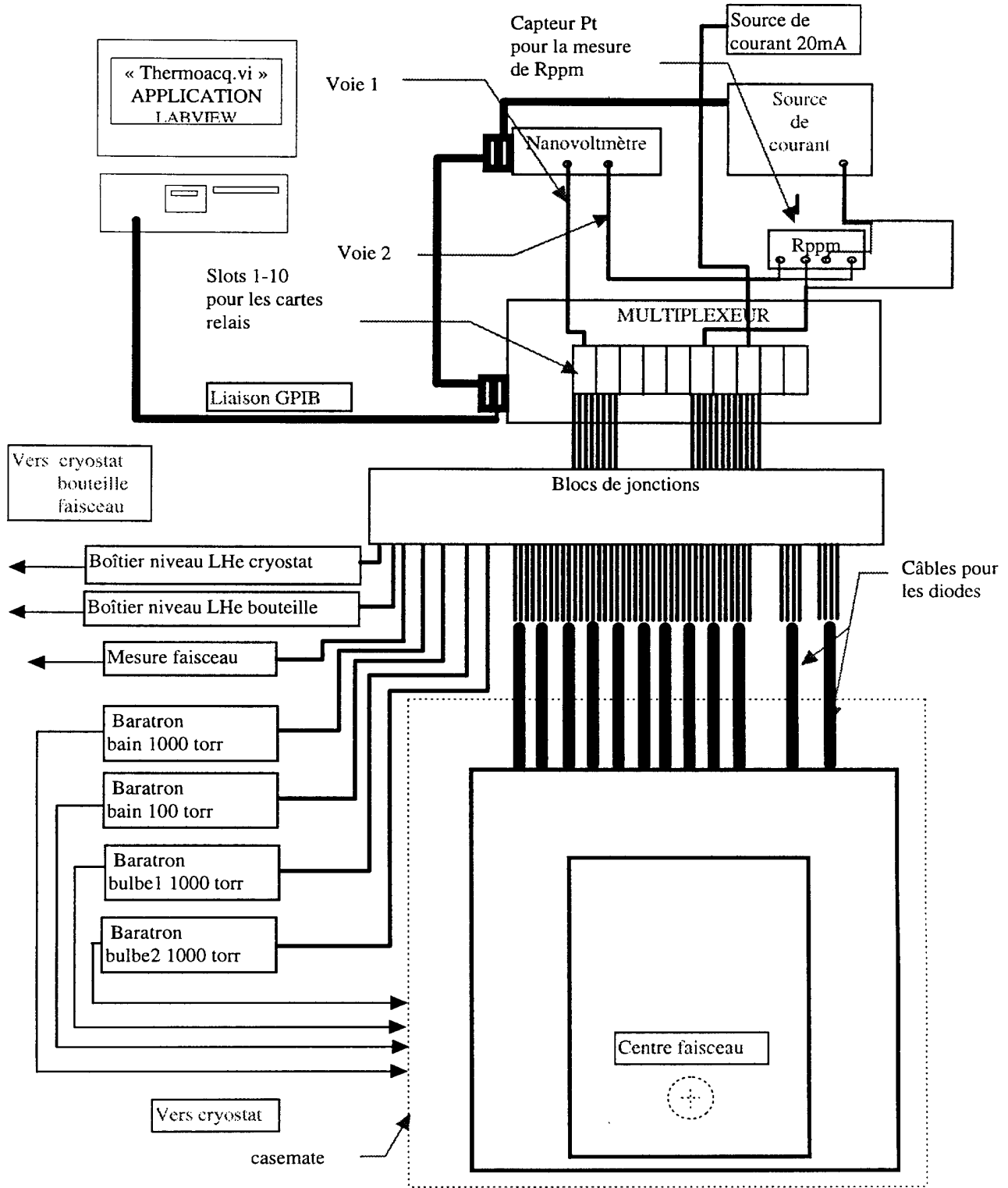


Figure 12 - Schéma du système d'acquisition

### Matériel utilisé:

Tous les appareils sont pilotés par liaison GPIB. Le programme d'acquisition tourne sur un PC sous Labview. Les sauvegardes des données s'effectuent à la fin de chaque scan.

- Source de courant Keithley 263 ( Incertitude:  $\sigma_I/I = 7 \cdot 10^{-4}$  )
- Nanovoltmètre HP34420A ( Incertitude:  $\sigma_u/u = 4 \cdot 10^{-5}$  )
- Multiplexeur Keithley 7002 ( bruit:  $\sigma_u/u = 5 \cdot 10^{-7}$  sur la tension et  $\sigma_I/I = 10^{-10}$  sur le courant)

### Bruits mesurés:

Le tableau suivant résume les valeurs de bruit mesurées lors des trois expériences. Les valeurs reportées sont des mesures effectuées sur des capteurs représentatifs.

Expérience	Mai 97	Septembre 97	Octobre 97
$\sigma_R/R$ RPPM	-	$2 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$
$\sigma_I/I$ source courant	$7 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-6} / 6 \cdot 10^{-5}$ **
$\sigma_R/R$ CERNOX	$10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$
$\sigma_R/R$ Allen-Bradley	$10^{-3}$	$10^{-3}$	$6 \cdot 10^{-5} / 1,2 \cdot 10^{-4}$ **
$\sigma_R/R$ TVO	$10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-5} / 4 \cdot 10^{-5}$ **
$\sigma_R/R$ RhFe CM	-	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_R/R$ RhFe bobinée	-	-	$4 \cdot 10^{-6} / 10^{-5}$ **
$\sigma_R/R$ FeB	$1,5 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$
$\sigma_R/R$ Pt100	$7 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4} / 2 \cdot 10^{-5}$ **	$2 \cdot 10^{-4}$
$\sigma_R/R$ Ge1B	-	-	$10^{-4}$
$\sigma_R/R$ Ge1C	-	-	$10^{-3}$
$\sigma_T$ bulbe He	0,25 mK	0,3 mK	0,05 mK / 0,2 mK *
$\sigma_T$ CERNOX	0,25 mK	0,7 mK	0,05 mK
$\sigma_T$ Allen-Bradley	0,25 mK	0,8 mK	0,035 mK / 0,07 mK **
$\sigma_T$ TVO	0,25 mK	0,2 mK	0,03 mK/0,07 mK **
$\sigma_T$ RhFe CM	-	0,25 mK	0,04 mK
$\sigma_T$ RhFe bobinée	-	-	0,05 mK
$\sigma_T$ Pt100	80 mK	2,5mK / 25 mK **	2,5 mK
$\sigma_T$ Ge1B	-	-	0,12 mK
$\sigma_T$ Ge1C	-	-	30 mK

\* Bruit intermittent sur le bulbe Hélium

\*\* Bruit corrélé avec le faisceau

Table 5 - Mesures de bruit lors des expériences d'irradiation



## 2 - Résultats

### A - Principe du dépouillement

Le but du dépouillement est de filtrer les phénomènes annexes pour ne garder que les variations de résistance dues à l'endommagement des capteurs par l'irradiation.

En premier lieu, on effectue le rejet des points trop loin de la température de consigne. En général, nous sélectionnons les points à  $T_{\text{consigne}} \pm 10\text{mK}$ . Sont également rejetés les points transitoires ( les remplissages ). Ils sont détectés par une variation importante de la température de référence. ( seuil:  $1\text{mK}/\text{mn}$  sur le bulbe). Ces traitements éliminent à peu près 20% des points acquis.

Il faut essentiellement supprimer les variations dues aux fluctuations de température du bain. C'est pourquoi nous effectuons une calibration avec le cryostat d'irradiation en début d'expérience. Lors de ces calibrations, nous prenons un nombre important de points autour de la température de consigne de l'expérience d'irradiation ( par exemple, pour l'expérience à 1,8K, nous avons pris des points de calibration à 1,79K; 1,795K; 1,8K; 1,807K et 1,815K ). Ceci nous permet d'avoir une bonne estimation de la sensibilité du capteur dans cette zone.

Même si la précision de notre calibration est de l'ordre du mK en absolu, le fait d'utiliser le même matériel dans la même configuration et à des moments très proches pour irradiation et calibration réduit l'incertitude relative à 0,3mK.

Lors de l'irradiation, nous mesurons en permanence  $T_{\text{ref}}$  par le bulbe Hélium. De la mesure de résistance du capteur, on déduit  $T_{\text{capteur}}$  en utilisant la fonction de calibration.

On obtient donc un  $\Delta T = T_{\text{capteur}} - T_{\text{bulbe}}$ , que nous utilisons pour retrouver les variations de résistance.

La courbe suivante représente le résultat de ce traitement pour un capteur Rhodium-Fer bobiné irradié en Septembre 97 à  $T_{\text{bain}} = 2,1\text{K}$ .

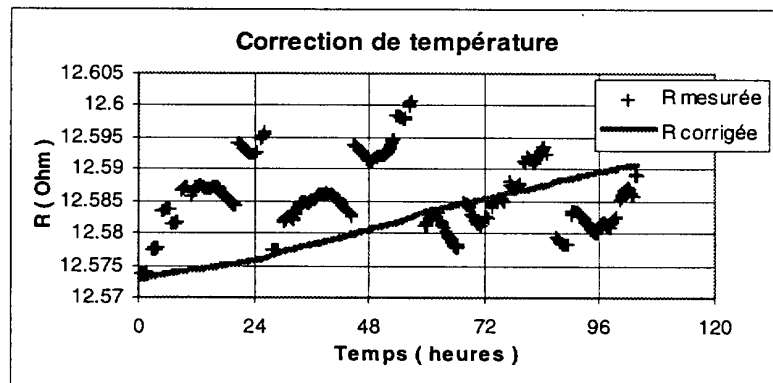


Figure 13

Remarque sur la correction:

La correction utilise une valeur bruitée: la température du bain. Cette procédure ajoute donc à la valeur de résistance mesurée la valeur du bruit thermique, qui peut même devenir prépondérant.

## B- Irradiations des thermomètres Pt100

Avec une sensibilité très faible, les Platines ne sont pas adaptées à la mesure de température en dessous de 20K. Leur intérêt dans ces expériences est de jouer un rôle de témoin: l'irradiation des métaux purs à basse température a été l'objet de nombreuses études; on sait donc à priori quel comportement observer. D'autre part, l'insensibilité de ces capteurs à la température nous permet de mesurer directement le bruit de l'acquisition en filtrant le bruit thermique. ( entre 1,8K et 4,2K,  $dR/dT=1,2 \text{ m}\Omega/\text{K}$  pour  $R \approx 0,15\Omega$  )

Les trois courbes suivantes montrent l'évolution de résistance d'une Pt 100 pendant les trois irradiations.

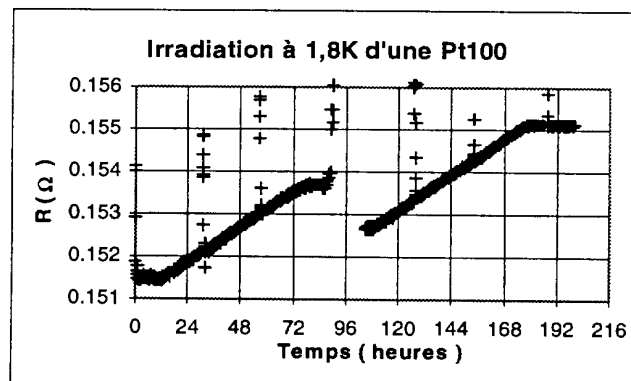


Figure 14 - irradiation Octobre 97 d'une Pt 100

La dose totale reçue par ce capteur est de  $1,12 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2$ ; la zone du milieu correspond à un recuit à 300K qui guérit 50% des défauts induits par l'irradiation. Les zones horizontales correspondent à des arrêts du faisceau; les pics sont les remplissages quotidiens ( remontée de la température à 4K ). Avant le recuit, nous avons une dose de  $5,5 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$  et  $\Delta R/R = 1,4 \cdot 10^{-2}$ .

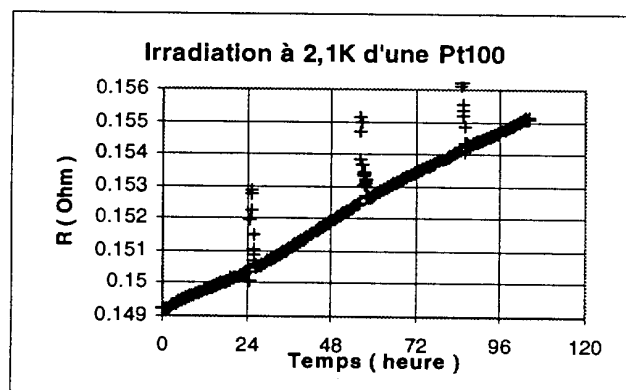


Figure 15 - Irradiation Septembre 97 d'une Pt100

Ce capteur a reçu lors de cette expérience une dose totale de  $1,46 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2$ , pour  $\Delta R/R = 4 \cdot 10^{-2}$ . La pente de cette courbe est toujours proportionnelle à l'intensité du faisceau. Comme pour la courbe précédente, les pics correspondent aux remplissages.

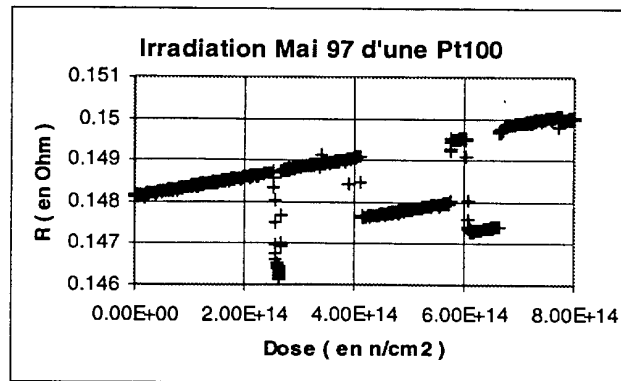


Figure 16 - Irradiation à 4,2K d'une Pt100

Les décrochages de cette courbe correspondent à des périodes de fonctionnement à plus basse température ( 1,8K; 3K et 2,1K ). On constate que si la résistance est plus basse, la tendance reste à l'augmentation de résistance pendant l'irradiation.

Cette courbe d'irradiation est tracée en dose ( voir la partie estimation de la dose reçue ), et on ne voit alors plus les changements d'intensité du faisceau ( pour une température fixe, la pente reste constante ). Cela montre la proportionnalité entre dose reçue et variation de résistance pour les Platines.

Pour ce capteur, la dose reçue est de  $8 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$  et  $\Delta R/R = 1,35 \cdot 10^{-2}$ .

### Conclusions pour les Platines

Plusieurs types de platines ont été testées: trois types de thermomètres et deux fils bobinés ( diamètre 25mm, longueur 46 cm,  $R=100\Omega$  à température ambiante ). Cette tendance à l'augmentation de résistance proportionnelle à la dose totale reçue se retrouve dans la totalité des échantillons irradiés.

Les défauts induits par l'irradiation ne sont pas permanents: le recuit à 300K effectué lors de l'expérience d'octobre montre une guérison de 50% des défauts créées sur l'ensemble des Platines irradiées.

Pour deux températures très proches, la pente de la dérive de résistance est identique. Ainsi, nous avons:  $\Delta R/R \cdot \Phi^{-1} = 2,5 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$  pour l'expérience à 1,8K et  $\Delta R/R \cdot \Phi^{-1} = 2,7 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$  pour l'expérience à 2,1K. Par contre, à  $T=4,2\text{K}$  nous avons  $\Delta R/R \cdot \Phi^{-1} = 1,7 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$ . Nous pouvons en déduire qu'il y a un phénomène de recuit à 4,2K pour les thermomètres platine.

A cause de la faible sensibilité thermique des platines dans la gamme de température étudiée, l'irradiation induirait une erreur sur la lecture de température de l'ordre du Kelvin si on les utilisait comme thermomètres.

### C- Irradiation des Rhodium-Fer

Les thermomètres Rhodium-Fer ( RhFe ) sont de deux types: fil bobiné ou couche mince. Ces thermomètres sont métalliques:  $dR/dT$  est positif.

La courbe suivante reproduit le résultat d'une calibration d'un thermomètre RhFe couche mince (CM).

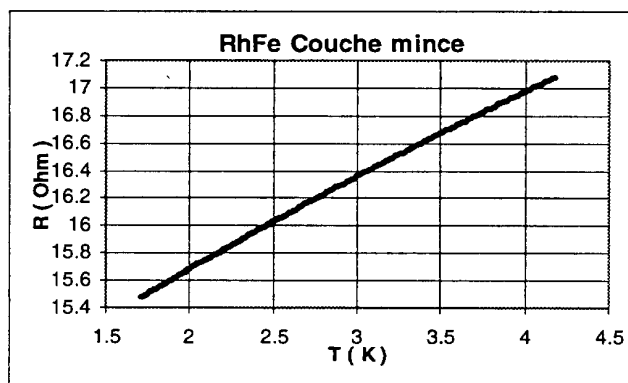


Figure 17 - Calibration RhFe C.M.

Remarques:

- Il y a une importante dispersion dans les RhFe couche mince: la résistance à 4,2K varie de 11Ω à 17Ω, et la sensibilité est comprise entre 0,6 et 1 Ω/K.

- Nous n'avons pu tester que deux RhFe bobinées. A T=1,8K leur résistance est de 1,7Ω et leur sensibilité de 0,17 Ω/K.

Il est probable qu'une différence de composition des alliages soit à l'origine de la différence entre les sensibilités des deux types de thermomètres.

#### Résultats des irradiations:

Contrairement aux Platines, la sensibilité des RhFe est suffisamment élevée pour que la résistance nécessite une correction en température.

La courbe suivante donne le résultat de l'irradiation d'Octobre 97 pour deux thermomètres RhFe: l'un en couche mince et l'autre bobiné. La couche mince était à 9 cm de la cible, le capteur bobiné à 11 cm.

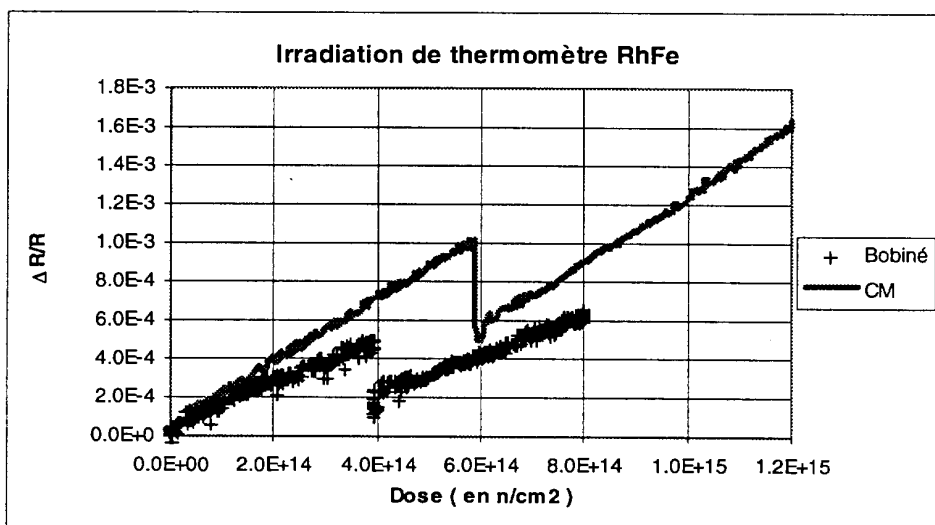


Figure 18 - Irradiation Octobre 97 de RhFe

Remarques:

- L'ensemble des irradiations de RhFe a donné des résultats comparables; les courbes de la figure 18 sont donc représentatives du comportement des deux types de thermomètres..
- Les expériences à 1,8K et 2,1 K ont montré des résultats strictement similaires
- L'augmentation de résistance est proportionnelle à la dose totale reçue
- La coupure au milieu de chaque courbe correspond au recuit à 300 K
- Les arrêts faisceau se traduisent par des plateaux sur les caractéristiques des courbes.
- Dans le cas des RhFe couche mince, à dose reçue égale, tous les capteurs subissent une dérive en résistance équivalente :  $\Delta R/R \cdot \Phi^{-1} = 1,75 \cdot 10^{-18} \text{ cm}^2 \pm 20 \%$

Capteur	RhFe couche mince	RhFe bobiné
Dose ( sans recuit )	$4 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$	$4 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$
R @ 1,8K	15Ω	1.7Ω
dR/R @ 1,8K	0,8 Ω/K	0,17 Ω/K
ΔR	0,01Ω	0,00085Ω
ΔR/R	$7 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$
ΔT mesuré	12,5 mK	5 mK
Guérison par recuit 300K	40%	50%

Table 6 - Résultats de l'irradiation de thermomètres RhFe à T=1,8K

#### Etude des irradiations+recuits successifs

Un thermomètre Rhodium-Fer a été inséré dans trois expériences. Le tableau suivant résume l'évolution de ce capteur.

Etat du capteur	R @ 2,1K ( en Ohm )	Remarque
Avant irradiation	15,714	Calibration avant irradiation
Irradié $1,5 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2$	15,744 ( +1,9 % )	1ère irradiation Septembre
Recuit 300 K une semaine	15,728	Guérison 36 %
Irradié $1,25 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2$	15,762 ( + 2,1 % )	2ème irradiation Septembre
Recuit 300K deux semaines	15,755	Guérison 20 %
Irradié $4,5 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$	15,76 ( + .03 % )	1ère irradiation Octobre
Recuit 300K une heure	15,757	Guérison 50 %
Irradié $4,5 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$	15,767 ( + 0.06 % )	2ème irradiation Octobre

Table 7 - Evolution de la résistance d'un thermomètre RhFe après plusieurs irradiations

#### Conclusions pour les Rhodium - Fer

Pour les capteurs RhFe, nous pouvons nous attendre à une dérive de 30 mK pour  $10^{15} \text{ n/cm}^2$  dans le cas des couches minces, et de 12mK pour la même dose dans le cas des capteurs bobinés. Les recuits à 300 K induisent une réparation du capteur de l'ordre de 50%. L'augmentation de résistance des capteurs est strictement proportionnelle aux doses totales reçues.

On constate en observant les valeurs de la table 7 une modification sensible du comportement du capteur lors des irradiations après le recuit de deux semaines. Une modification de structure ( comme une oxydation ) pourrait expliquer ceci. On sait par ailleurs que certains alliages s'oxydent très rapidement après irradiation. Des expériences sur la structure des capteurs, telle l'observation au microscope électronique à balayage, serait intéressante dans le cas de ce capteur.

## D - Irradiations des TVO

Les figures suivantes représentent la calibration d'un thermomètre TVO et l'évolution de résistance d'un thermomètre lors de l'irradiation d'Octobre 1997 (Hélium 1,8K).

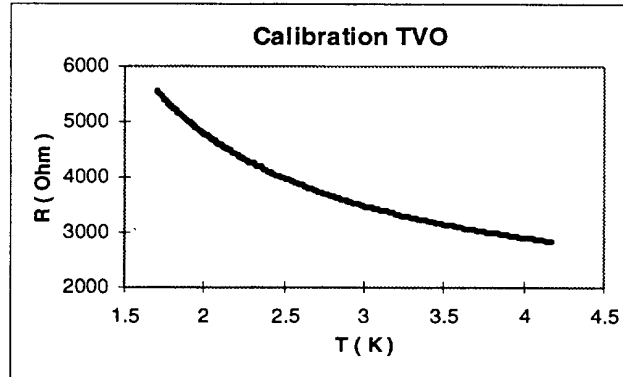


Figure 19

Pour ce thermomètre, à  $T=1,8\text{K}$  nous avons  $R=5200\ \Omega$  et  $dR/dT=-2800\ \Omega/\text{K}$

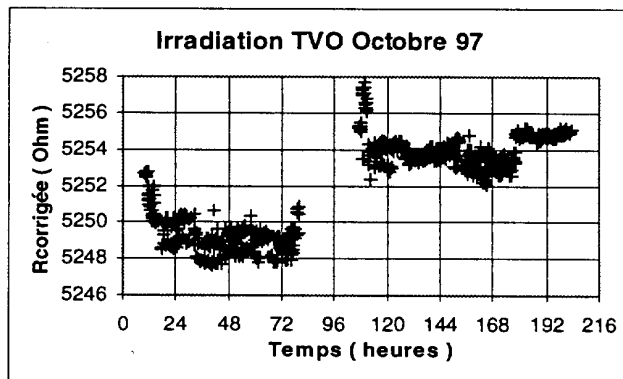


Figure 20 - Résistance d'un capteur TVO pendant l'irradiation ( $T_{\text{bain}}=1,8\ \text{K}$ )

La dose totale reçue par ce capteur est de  $1,2 \cdot 10^{15}\ \text{n/cm}^2$ . La coupure en milieu de courbe est un recuit à 300 K.

Commentaires:

- La résistance tracée est une valeur corrigée par la température du bain.
- L'influence du recuit à 300K en milieu d'expérience est difficile à déterminer: l'incertitude sur la valeur absolue de la température est de l'ordre du mK, ce qui correspond à  $3\ \Omega$  pour ce type de thermomètre. Le saut de résistance observé lors du recuit est de  $6\ \Omega$ .

### Echauffement des capteurs TVO par le faisceau

A chaque arrêt du faisceau ( par exemple à t=179h sur la figure 20 ) on peut observer un saut de résistance sur les capteurs. Nous en déduisons que les capteurs de ce type subissent un échauffement par le faisceau.

Ce phénomène est observé pour les trois expériences d'irradiation. Le tableau suivant nous donne quelques valeurs d'échauffement mesurées.

Expérience et température du bain	Flux de neutrons	Echauffement
Mai 97 ( 4,2K )	$2.5 \cdot 10^9 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$	+ 1,5 mK
Septembre 97 ( 2,1 K )	$4,6 \cdot 10^9 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$	+ 1,15 mK
Septembre 97 ( 2,1 K )	$2.7 \cdot 10^9 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$	+0,7 mK
Octobre 97 ( 1,8 K )	$2.8 \cdot 10^9 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$	+ 0,8 mK
Octobre 97 ( 1,8 K )	$2 \cdot 10^9 \text{ n.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$	+ 0,55 mK

Table 8 - Echauffement des TVO par le faisceau

### Variation de résistance due à l'irradiation

En corrigeant la résistance lue avec la température du bain et l'échauffement dû au faisceau, on obtient la courbe suivante.

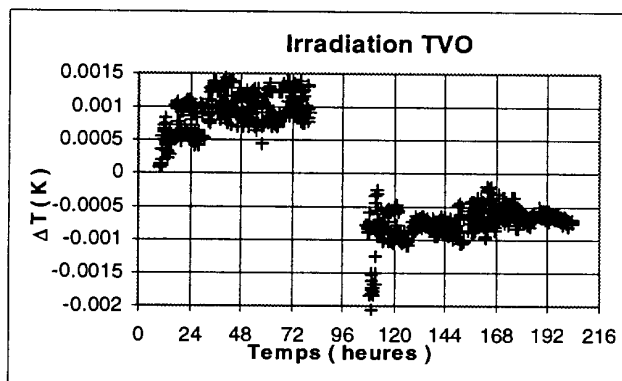


Figure 21

Sur cette courbe sont filtrés à la fois les effets de dérive du bain et ceux de l'échauffement lié au faisceau. Les variations qui restent sont celles liées à l'endommagement du capteur par l'irradiation.

En début d'irradiation, et pour tous les capteurs, la résistance diminue très rapidement pour atteindre une valeur seuil. Le bruit de l'acquisition et la vitesse de montée ne nous permet pas de déterminer le temps de montée pour les expériences en Hélium superfluide. Dans le cas de l'expérience de Mai 97, la résistance minimale est atteinte à une dose de  $5.10^{14} \text{ n/cm}^2$ .

Expérience	R@Tconsigne (Ω)	dR/dR (Ω/K)	Débit de Dose ( $10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$ )	Dose ( $\text{n/cm}^2$ )	$\Delta R/R$ irradiation	$\Delta T$ irradiation ( mK )
Mai 97 (4,2K)	3000	-600	2,5	$9,7 \cdot 10^{14}$	$-1,3 \cdot 10^{-4}$	0,6
Sept 97 (2,1K)	4600	-1800	2,7	$10^{15}$	$-2,6 \cdot 10^{-4}$	0,6
Oct 97 (1,8K)	5400	-2800	2	$10^{15}$	$-5 \cdot 10^{-4}$	0,8

Table 9 - Résultats de l'irradiation pour un thermomètre TVO représentatif pour chaque expérience

## Conclusions pour les thermomètres TVO

- Les thermomètres subissent un échauffement dû au faisceau. A basse température ( 1,8K ) on peut estimer cet échauffement:  $\Delta T$  ( mK ) =  $\Phi * 2.7 * 10^{-10}$  (  $\pm 15\%$  ) avec  $\Phi$  le flux en neutrons/cm<sup>2</sup>/s.
- La dérive induite à priori par la création de défauts est de l'ordre du mK, avec une saturation très rapidement atteinte. Cette dérive semble se maintenir après la coupure faisceau.
- Le manque de précision sur la valeur absolue de la température de référence ( précise à 1 mK ) nous empêche de nous prononcer sur l'influence du recuit
- Pour la même raison, une comparaison entre les calibrations avant et après irradiation est inutile: nous nous attendons à observer des dérives de l'ordre du mK.

## E - Irradiation des Allen-Bradley

Pour les trois températures, l'irradiation des thermomètres Allen-Bradley ( AB ) a donné des résultats similaires.

En premier lieu, voici la courbe caractéristique d'un thermomètre Allen-Bradley à basse température.

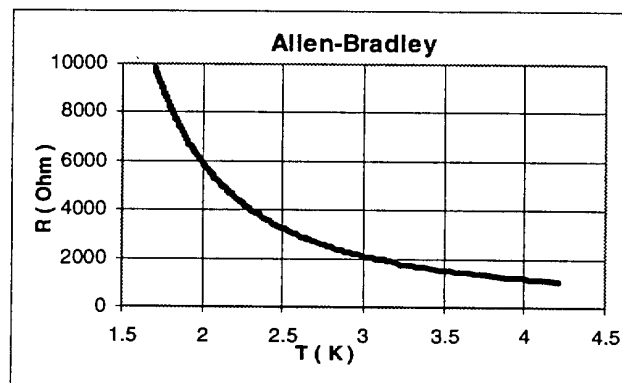


Figure 22 - Calibration AB

La courbe suivante représente le résultat de l'irradiation pour l'expérience Octobre 97 pour un de ces capteurs.

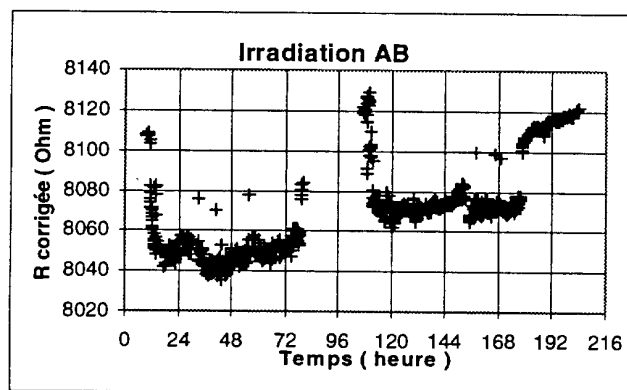


Figure 23 - Irradiation d'un thermomètre AB à T=1,8K

La dose totale reçue par ce capteur est de  $9 * 10^{14}$  n/cm<sup>2</sup>; la discontinuité au milieu du graphe est le recuit à 300K. L'arrêt définitif du faisceau est à t=179 h ( saut de résistance )



Comme pour les TVO, on observe une diminution de la résistance des capteurs liée au faisceau, ainsi qu'une diminution de résistance due probablement à la création de défauts. Le tableau suivant résume les résultats pour plusieurs capteurs représentatifs.

Expérience	T bain	Débit de dose (n/cm <sup>2</sup> /s)	Dose (n/cm <sup>2</sup> )	R capteur (Ω)	dR/dT (Ω/K)	ΔR/R irradiation (%)	ΔT irradiation (mK)	ΔT échauffement faisceau (mK)
Mai 97	4,2	2 10 <sup>9</sup>	8,3 10 <sup>14</sup>	969	-400	-0,02	0,5	1,1
Sept. 97	2,1	2.2 10 <sup>9</sup>	8 10 <sup>14</sup>	4550	-6000	-0,2	1,5	2,25
Oct. 97	1,8	1.73 10 <sup>9</sup>	8,6 10 <sup>14</sup>	8100	-13700	-0,32	1,9	1,6
Oct. 97	1,8	2.2 10 <sup>9</sup>	1.1 10 <sup>15</sup>	8560	-10500	-0,35	1,9	1,9

Table 10 - Résultats des irradiations pour plusieurs Allen-Bradley

### Evolution des capteurs après irradiation

Après la coupure faisceau, la température du bain a été maintenue à 1,8K pendant 20 heures. Pour les thermomètres de cette famille, la résistance a évolué pendant cette période. Le graphe suivant représente cette évolution.

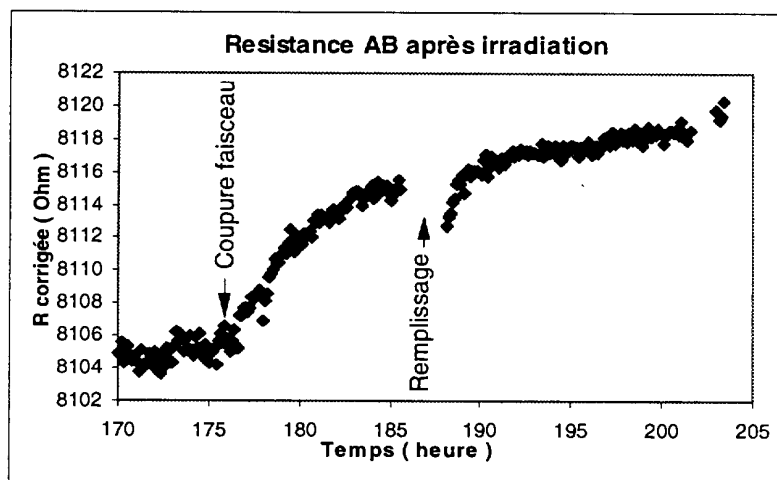


Figure 24 - Résistance AB après la coupure du faisceau

Remarque: la résistance ici représentée est corrigée par la température du bain et l'intensité du faisceau.

## Conclusions pour les thermomètres Allen-Bradley

- Les thermomètres Allen-Bradley subissent un échauffement dû au faisceau, avec pour  $T=1,8K$ :

$$\Delta T = \Phi \times 8,63 \cdot 10^{-10} (\pm 15\%) \quad \text{avec } \Delta T \text{ l'échauffement en mK}$$

$\Phi$  le flux de neutrons en  $n/cm^2/s$

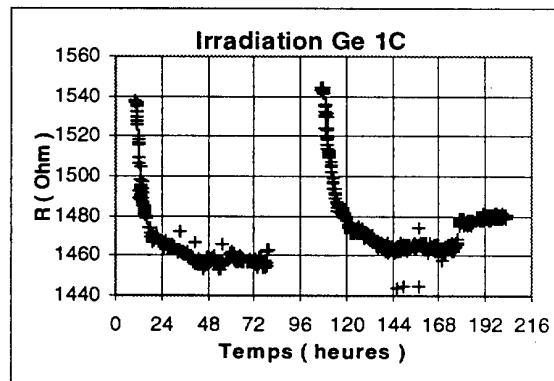
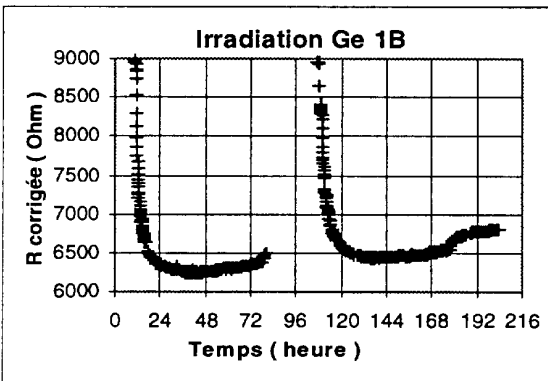
- Les défauts induits par le faisceau sont créés très rapidement, et atteignent une saturation en moins d'une heure. Leur nombre (proportionnel à  $\Delta R/R$ ) semble dépendre de la température mais pas de l'intensité du faisceau. Dans les expériences effectuées, nous avons pu constater des  $\Delta T$  induits par les défauts compris entre 0,5 mK et 2 mK.

- Les défauts créés ne sont pas permanents: leur nombre décroît de façon exponentielle dès la coupure du faisceau. A 1,8K, on observe une guérison associée à une constante de temps  $\tau = 10,8 \text{ h}$ . Cette valeur est constante pour tous les thermomètres AB irradiés en Octobre 97 à 1,8K.

## F - Irradiation des thermomètres Germanium

Les thermomètres Germanium irradiés sont de deux types: 1B et 1C.

Cinq thermomètres ont été irradiés en Octobre 97. Les deux courbes suivantes donnent l'allure de la variation de résistance pour les deux types de thermomètres.



Figures 25 et 26

Dans le cas de la Germanium 1B, la résistance est corrigée avec la température du bain. On constate une décroissance exponentielle de la résistance des échantillons pendant les phases d'irradiation. Dans le cas des Ge 1B, le recuit à 300 K guérit totalement le capteur. Après la fin de l'irradiation, la résistance remonte légèrement (10% de la dérive initiale), de façon exponentielle pour les capteurs de la famille 1B et de façon instantanée pour les capteurs de la famille 1C.

Nous avons irradié 5 thermomètres Germanium, et observé une grande variété de résultats. La table de la page suivante résume le comportement de tous les thermomètres Germanium irradiés.

Capteur	Ge 1B	Ge 1B	Ge 1C	Ge 1C	Ge 1C
dR/dT ( $\Omega/K$ )	-8000	-14600	-70	-80	-90
Flux neutrons ( $n/cm^2/s$ )	$2.3 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$	$1,6 \cdot 10^9$	$1,9 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^9$
Dose totale ( $n/cm^2$ )	$1,1 \cdot 10^{15}$	$1 \cdot 10^{15}$	$8,1 \cdot 10^{14}$	$9,4 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$
R à 1,8K avant irradiation	8980 $\Omega$	15840 $\Omega$	1974 $\Omega$	2342 $\Omega$	1537 $\Omega$
$\Delta R$ 1ère irradiation	-2110 $\Omega$	-4540 $\Omega$	-62 $\Omega$	-122 $\Omega$	-79 $\Omega$
$\tau$ 1ère irradiation	1,4 h	2,3 h	3,6 h	2,9 h	2,9 h
$\Delta R/R$ 1ère irradiation	-23 %	-28 %	-3,1 %	-5,2 %	-5,1 %
R à 1,8K après recuit	8940 $\Omega$	15750 $\Omega$	1965 $\Omega$	2370 $\Omega$	1544 $\Omega$
$\Delta R$ 2ème irradiation	-2500 $\Omega$	-4000 $\Omega$	-60 $\Omega$	-110 $\Omega$	-79 $\Omega$
$\tau$ 2ème irradiation	2,6 h	4 h	9,4 h	8,7 h	5,8 h
$\Delta R/R$ 2ème irradiation	-25 %	-25 %	-3 %	-4,6 %	-5,1 %
$\Delta R$ à 1,8K après coupure	+260 $\Omega$	+350 $\Omega$	+10 $\Omega$	+20 $\Omega$	+13 $\Omega$
$\frac{\Delta R_{coupure}}{\Delta R_{irrad}}$	10,4 %	8,75 %	17 %	18 %	16,5 %
$\tau$ coupure	2,6 h	4 h	-	-	-

Table 11 - Résultats des Irradiations des thermomètres Germanium

Remarque:  $\tau$  est la constante de temps mesurée lors de phénomènes de croissance/décroissance exponentielle.

Les courbes suivantes montrent pour un capteur de chaque type le cycle des calibrations: avant irradiation, après irradiation et après recuit.

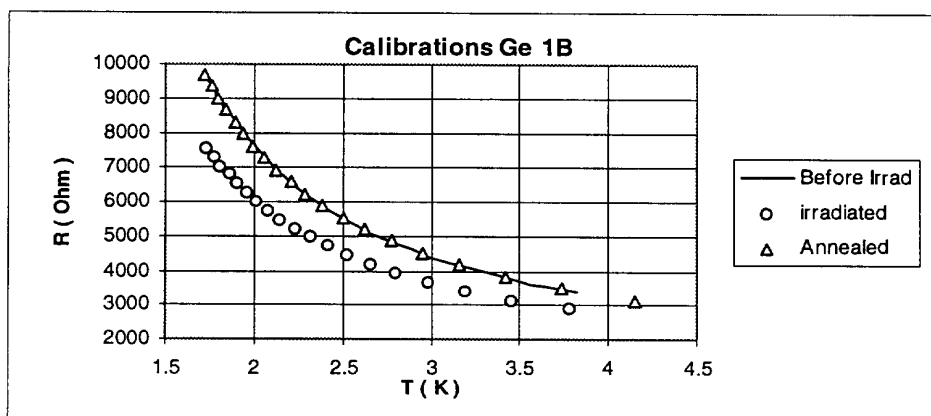


Figure 27

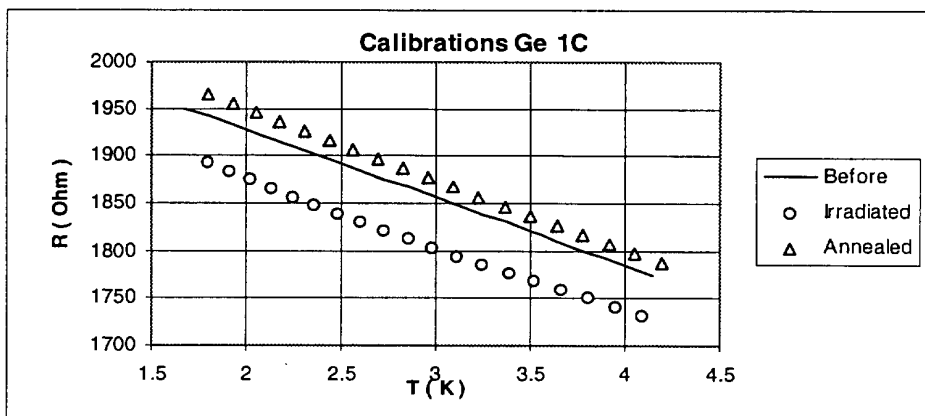


Figure 28

### Conclusions pour les thermomètres Germanium

- Les variations induites par l'irradiation sont très importantes: en lecture de température, l'erreur induite atteint 300 mK pour le type 1B et 1K pour le type 1C. Cette erreur maximale est atteinte en une dizaine d'heures ( $7 \cdot 10^{13} \text{ n/cm}^2$ ).
- En comparant les thermomètres d'une même famille, on remarque que les dérive maximales et les constantes de temps des dérives ne semblent pas proportionnelles aux flux de neutrons.
- Le recuit à 300K a guéri les thermomètres 1B à 98% ( erreur sur le cycle irradiation+recuit: 5mK ). Par contre les thermomètres 1C ne retrouvent pas leur valeur d'origine. (erreur d'une centaine de mK).
- Les constantes de temps des dérives dues au faisceau s'allongent après le recuit, alors que les amplitudes des variations restent inchangées.
- A température stabilisée et sans faisceau, les thermomètres de type 1B se guérissent de 10% avec la même constante de temps que lors de la dérive.
- Pour les thermomètres 1C, l'arrêt faisceau se manifeste par un shift instantané compensant 17 % de la dérive totale.

## G - Irradiation des Cernox

Les thermomètres CERNOX sont des couches minces semi-conductrices; la dispersion entre les différentes séries est importante: à 1,8K nous avons mesuré des résistances allant de 10000Ω à 25000Ω. Toutefois, la sensibilité des capteurs  $1/R \text{ d}R/\text{d}T$  reste à peu près constante pour l'ensemble des thermomètres.

La figure suivante représente la calibration d'un thermomètre Cernox.

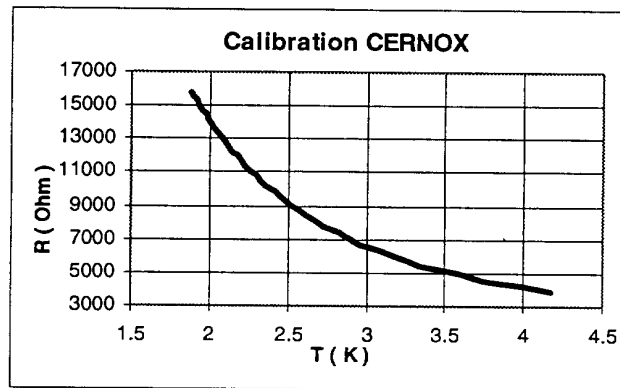
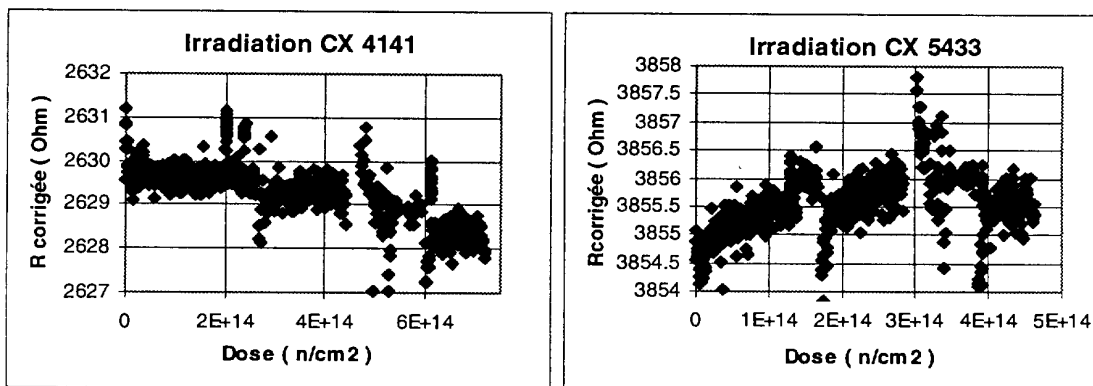


Figure 29

## Résultats de l'irradiation

Nous avons irradié des thermomètres provenant de trois séries différentes ( la série est le nombre des milliers dans le numéro du capteur ). Pour chaque expérience, nous avons eu des résultats différents. Toutefois, au sein de chaque expérience, les capteurs de même famille ont montré des comportements similaires.

- Expérience Mai 97 à 4,2K: thermomètres série 4000 et 5000



Figures 30 et 31

On constate une tendance assez nette à la diminution de résistance sur les capteurs de la série 4000 ( $\Delta R/R = -6,5 \cdot 10^{-4}$ ), et une tendance moins nette à l'augmentation de résistance pour les capteurs de la série 5000 ( $\Delta R/R = 2,6 \cdot 10^{-4}$ ). Le bruit total ( $\pm 0,5 \text{ mK}$ ) est du même ordre de grandeur que les variations observées, ce qui rend ces dernières peu fiables.

- Expérience Septembre 97: thermomètres série 5000

Le graphe de la figure 32 représente le comportement du thermomètre CX 5441, irradié à  $T_{\text{bain}}=2,1\text{K}$  avec une dose totale de  $1,23 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2$ .

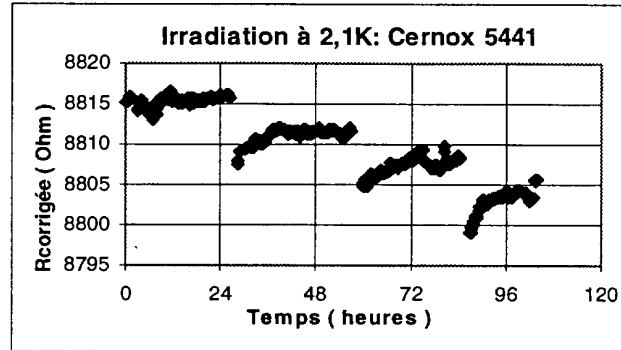


Figure 32

Deux phénomènes semblent se combiner: une diminution de résistance sur la durée totale de l'irradiation, et des remontées de moindre amplitude. Les décrochages de la courbe correspondent aux remplissages. Il est intéressant de tracer la courbe du niveau d'Hélium dans le cryostat lors de la même expérience. Nous ne disposons pas de mesure directe du niveau en continu dans le bain: la sonde supra perturbe le bain. Nous pouvons toutefois déduire ce niveau à partir de la température lue par un thermomètre placé sur la bride inox ( en haut du cryostat ): la température est inversement proportionnelle au niveau; nous avons pu vérifier cette correspondance en mesurant « manuellement » le niveau pendant l'expérience.

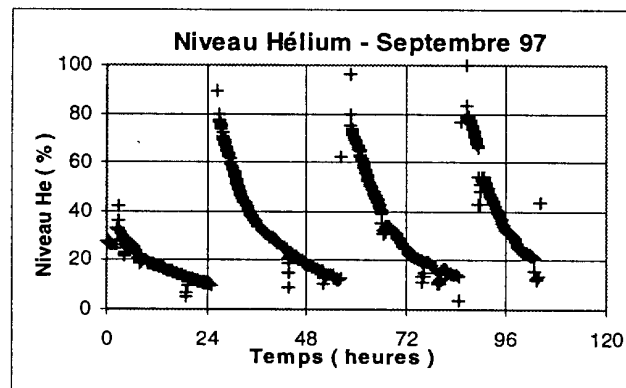


Figure 33

La température des Cernox semble décroître avec le niveau d'Hélium du bain.  
La variation totale de hauteur d'Hélium dans le cryostat est de 50cm.

Le niveau d'Hélium induit une variation de 0,6 mK sur les Cernox à  $T=2,1\text{K}$ , alors que l'irradiation provoque une dérive de l'ordre de +1,5 mK.

- Expérience Octobre 97: thermomètres série 6000

Comme lors de l'expérience à 2,1 K, nous voyons sur la résistance du capteur l'effet du niveau d'Hélium.

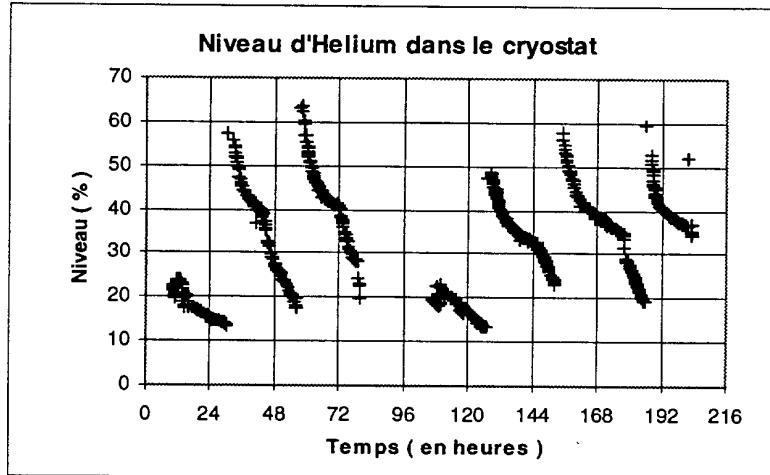


Figure 34 - Niveau d'Hélium dans le cryostat ( expérience à 1,8K )

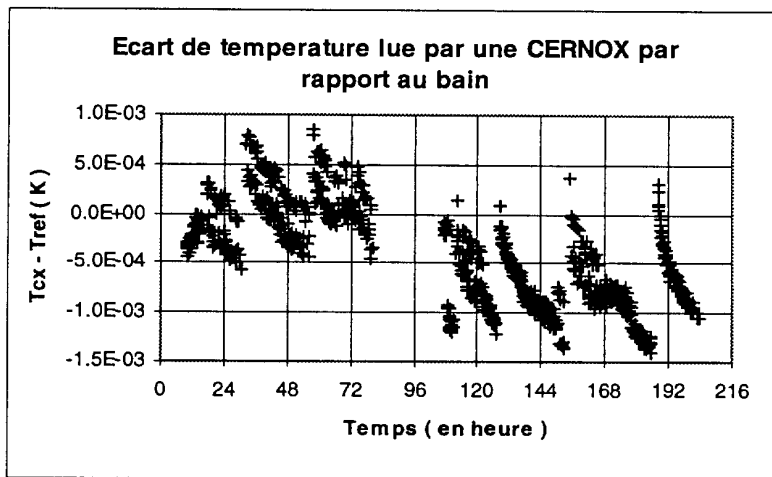


Figure 35 - Ecart de température lue par une Cernox par rapport au bain

On constate que la courbe de température de la Cernox suit les variations de niveau du bain.

L'amplitude des variations induites par le niveau d'Hélium ( 1,5 mK ) nous interdit une lecture directe de la dérive de résistance due au faisceau.

Comme nous avons observé une corrélation entre le niveau du bain et la température des Cernox, nous effectuons une correction empirique de la résistance par le niveau d'Hélium ( figure 36 ).

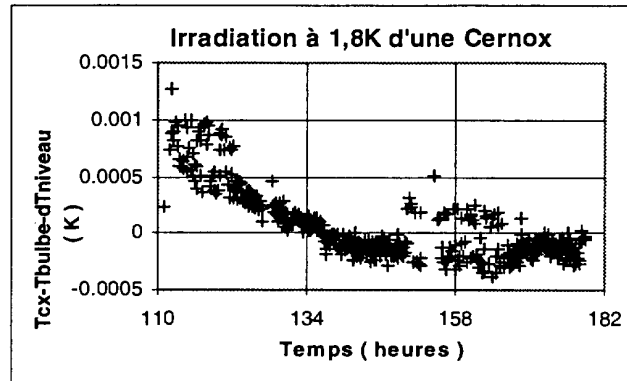


Figure 36

Remarque: la correction appliquée ici est empirique: si elle permet l'évaluation de la dérive de résistance liée à l'endommagement du capteur, elle ne permet pas le calcul d'une constante de temps.

On constate pour que les capteurs de cette série ( ici une Cernox irradiée à 1,8K pour une dose totale de  $5,5 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$  ) la dérive en température est de l'ordre de -1,2 mK, ce qui correspond à une dérive en résistance de  $+20\Omega$  (+0,12 %).

Le tableau suivant résume les différents comportements observés pour les capteurs CERNOX lors des irradiations en Hélium de 1997.

Thermomètre	CX 4141	CX 5433	CX 5441	CX 5448	CX 6947	CX 6949
Expérience	Mai 97	Mai 97	Sept. 97	Sept. 97	Oct. 97	Oct. 97
T	4,2 K	4,2K	2,1K	2,1K	1,8K	1,8K
R	2630 $\Omega$	3860 $\Omega$	8800 $\Omega$	12800 $\Omega$	10820 $\Omega$	16950 $\Omega$
dR/dT	-1000 $\Omega/K$	-1300 $\Omega/K$	-7400 $\Omega/K$	-12000 $\Omega/K$	-10900 $\Omega/K$	-16600 $\Omega/K$
Dose totale	$7 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$	$4,5 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$	$1,23 \cdot 10^{15} \text{ n/cm}^2$	$8,1 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$	$5,5 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$	$5,5 \cdot 10^{14} \text{ n/cm}^2$
Flux neutrons	$3,6 \cdot 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$	$2,3 \cdot 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$	$3,4 \cdot 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$	$2,2 \cdot 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$	$2,3 \cdot 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$	$2,3 \cdot 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$
$\Delta R$ irradiation	-1,7 $\Omega$	+1 $\Omega$ *	-12 $\Omega$	-10 $\Omega$	+15,6 $\Omega$ *	+20 $\Omega$ *
$\Delta R/R$ irradiation	-0,064%	+0,026% *	-0,13%	-0,08%	+0,14% *	+0,12% *
$\Delta T$ irradiation	+1,7 mK	-0,8 mK *	+1,6 mK	+0,8 mK	-1,4 mK *	-1,2 mK *
$\Delta T$ échauff. faisceau	+1,5 mK	-	+0,27 mK	+0,2 mK	+0,23 mK	+0,23 mK
$\Delta R$ niveau He (Rvide-Rplein)	-	-	-4 $\Omega$	-10 $\Omega$	-16 $\Omega$	-25 $\Omega$
$\Delta T$ niveau He (Tvide-Tplein)	-	-	+0,54 mK	+0,8 mK	+1,5 mK	+1,5 mK

\* Valeur incertaine car soumise à un bruit important ou issue d'une correction empirique

Table 12 - Résultats des irradiations de plusieurs Cernox représentatives de leur série



## Conclusions pour les capteurs CERNOX

- Nous avons observé une grande variété de comportements pour cette famille. Certains capteurs voient leur résistance augmenter avec l'irradiation, d'autres voient une diminution de résistance. Toutefois, au sein d'une même série, et pour une expérience donnée, les comportements sont cohérents.

Une telle variété de comportements n'est pas choquante pour des capteurs issus d'oxydation de couche mince, une technique pouvant induire une grande dispersion sur les propriétés des composants.

- La dérive de résistance est continue tout au long de l'irradiation. Nous n'avons pas pu observer de phénomène de saturation.

- La dérive de résistance semble se maintenir après la fin de l'irradiation.

- Les variations totales liées à l'irradiation restent inférieures à 2 mK en lecture de température.

- Nous avons observé sur ces thermomètres lors des expériences en superfluide un phénomène de diminution de température proportionnel au niveau d'Hélium dans le cryostat. Un effet direct de la pression hydrostatique sur les capteurs pourrait expliquer ces variations.

Une expérience pour vérifier cette hypothèse est prévue pour début 1998, où nous placerons des Cernox à plusieurs niveaux dans un cryostat et avec plusieurs configurations de thermalisation.

## Conclusions

Les irradiations de thermomètres de 1997 ont montrés que les capteurs les plus sensibles dérivait le moins en lecture de température. Ainsi, à des doses comparables ( correspondant à 10 ans de fonctionnement du LHC ), les TVO, Allen-Bradley et Cernox accusent des dérives de l'ordre de 1 à 2 mK, alors que les Rhodium-Fer bobinées dérivent de 10 mK et que les Rhodium-Fer couche mince dérivent de 25 mK.

Les Germanium, avec une bonne sensibilité mais une dérive de plusieurs centaines de mK, font exception à cette règle.

Nous avons observé un phénomène de corrélation entre niveau d'Hélium et température lue par les Cernox en superfluide. Ce phénomène semble reproductible et ne se produit que pour les Cernox. Des expériences complémentaires devront amener des informations sur ce phénomène.

Des expériences sur la structure et la composition des matériaux pourraient également aider à la compréhension de certains comportements.

D'autre part, on a remarqué que des phénomènes parasites ( bruits électroniques, bruits thermiques, dérive d'appareils, échauffement de capteurs par le faisceau ou par le niveau d'Hélium ) peuvent totalement masquer les phénomènes que l'on souhaite observer, d'où l'intérêt d'une instrumentation précise et la nécessité d'acquérir le plus possible de données annexes ( diagnostics dans le cryostat, températures de la baie d'acquisition, plusieurs lectures du courant... ) .

Ainsi, les capteurs sur blocs thermométriques placés sur la paroi externe de l'enceinte Hélium dans le vide d'isolement ne voient rien d'autre que l'échauffement dû au faisceau.

Un rapport annexe contenant tous les résultats expérimentaux sera réalisé début 1998.

## Expériences prévues pour 1998

- La calibration de tous les capteurs irradiés en 1997 pour tester les stabilisés à long terme
  - => Test de l'influence du niveau d'Hélium sur les Cernox
- Trois expériences d'irradiation de thermomètres à Grenoble
  - => Irradiation de nouveaux capteurs
  - => Tests supplémentaires sur les Cernox ( pas de comportement type observé à présent )

## Remerciements

Nous tenons à remercier tous les membres des services RDA Cavités supraconductrices et SBT de l'IPN d'Orsay pour leur participation aux préparations de l'expérience. Nous souhaitons également remercier toutes les personnes de l'ISN Grenoble et du cyclotron SARA pour leur aide, ainsi que L. Thomé ( CSNSM Orsay ) pour ses remarques et conseils.

Cette étude été réalisée en collaboration avec J. Casas-Cubillos et C. Balle de la division LHC du CERN.

## Références

[1] Estimations des doses dans le LHC:

K.M. Potter, H. Schonbacher, G.R. Stevenson

CERN-LHC report # 18, Novembre 95

[2] Résultats de l'expérience d'irradiation de thermomètres de Mai 97

T. Junquera, JF. Amand, JP. Thermeau et J. Casas-Cubillos

CERN-LHC Project Report #153, Novembre 97

Dosimétrie neutron sur l'accélérateur SARA:

J.Collot et al.

Nuclear Instrument and Methods A vol 350 ( 1994 ) p.525

## Index des figures et des tables

Figure 1	page 7	Photo des thermomètres
Figure 2	page 9	Sensibilité des différentes familles de thermomètres
Figure 3	page 10	Schéma de l'accélérateur SARA ( Source: ISN Grenoble )
Figure 4	page 10	Spectre de neutrons émis à 0° ( Source: J. Collot )
Figure 5	page 11	Schéma du cryostat d'irradiation
Figure 6	page 11	Photo de la cible Be et des plaquettes échantillons
Figure 7	page 12	Répartition de la dose neutrons
Figure 8	page 12	Décroissance de la dose reçue avec la distance
Figure 9	page 13	Intensité du faisceau de deutons sur la cible Be
Figure 10	page 13	Charge totale du faisceau
Figure 11	page 14	Courbe de tension de vapeur de l'Hélium
Figure 12	page 16	Schéma du système d'acquisition
Figure 13	page 18	Exemple de correction de la résistance par la température: thermomètre RhFe
Figure 14	page 19	Irradiation à 1,8K d'une résistance Platine
Figure 15	page 19	Irradiation à 2,1K d'une résistance Platine
Figure 16	page 20	Irradiation à 4,2K d'une résistance Platine
Figure 17	page 21	Calibration d'un thermomètre RhFe couche mince
Figure 18	page 21	Irradiation à 1,8K de thermomètre RhFe
Figure 19	page 23	Calibration d'un thermomètre TVO
Figure 20	page 23	Irradiation d'un thermomètre TVO
Figure 21	page 24	Irradiation d'un thermomètre TVO - Correction de l'échauffement faisceau
Figure 22	page 25	Calibration d'un thermomètre Allen-Bradley
Figure 23	page 25	Irradiation à 1,8K d'un thermomètre Allen-Bradley
Figure 24	page 26	Comportement après irradiation des AB irradiés à 1,8K
Figure 25	page 27	Irradiation à 1,8K d'un thermomètre Germanium 1B
Figure 26	page 27	Irradiation à 1,8K d'un thermomètre Germanium 1B
Figure 27	page 28	Calibrations d'un thermomètre Ge 1B: variations dues aux irradiations
Figure 28	page 29	Calibrations d'un thermomètre Ge 1C: variations dues aux irradiations
Figure 29	page 30	Calibration d'un thermomètre Cernox
Figure 30	page 30	Irradiation à 4,2K de la Cernox 4141
Figure 31	page 30	Irradiation à 4,2K de la Cernox 5433
Figure 32	page 31	Irradiation à 2,1K d'une Cernox
Figure 33	page 31	Niveau d'Hélium dans le cryostat lors de l'expérience à 2,1K
Figure 34	page 32	Niveau d'Hélium dans le cryostat lors de l'expérience à 1,8K
Figure 35	page 32	Ecart de température lue par une Cernox - expérience d'Octobre (1,8K)
Figure 36	page 33	Correction de l'écart de température par le niveau d'Hélium
Table 1	page 8	Caractéristiques des thermomètres
Table 2	page 8	Bilan des irradiations 1997
Table 3	page 9	Précision des thermomètres
Table 4	page 14	Régulation du bain
Table 5	page 17	Bruit mesuré lors des expériences d'irradiation
Table 6	page 22	Résultats des irradiations de thermomètres RhFe
Table 7	page 22	Influence de cycles Irradiation+recuits pour un thermomètre RhFe
Table 8	page 24	Echauffement des thermomètres TVO par le faisceau
Table 9	page 24	Résultats des irradiations de thermomètres TVO
Table 10	page 26	Résultats des irradiations de thermomètres Allen-Bradley
Table 11	page 28	Résultats des irradiations de thermomètres Germanium
Table 12	page 33	Résultats des irradiations de thermomètres Cernox

