CEA/SACLAY
DSM

# SERVICE TECHNIQUE DE CRYOGÉNIE ET DE MAGNÉTISME

FERMILAB
JUL 10 2000
LIBRARY

DAPNIA-STCM-00-11

Fermilab Library
0 1160 0091469 2

DAPNIA/STCM-00-11 Juin 2000

# SACRAL THEATER, UN CODE POUR SIMULER LA PROPAGATION DE LA TRANSITION DE L'AIMANT SUPRACONDUCTEUR LHC ATLAS BARREL TOROID

**B. Gastineau**

DAPNIA

*Présenté aux «Sixièmes Journées d'Aussois (France)», 16-19 mai 2000*

Département d'Astrophysique, de Physique des Particules, de Physique Nucléaire et de l'Instrumentation Associée
CEA/Saclay F-91191 Gif-sur-Yvette Cédex

Couverture : Sylvie Cabrit et Marc Sauvage

COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

DSM/DAPNIA/STCM

**Rapport n° 11**
le 5 juin 2000

B. GASTINEAU

# SACRAL THEATER, UN CODE POUR SIMULER LA PROPAGATION DE LA TRANSITION DE L' AIMANT SUPRACONDUCTEUR LHC ATLAS BARREL TOROID

**Association Française du Froid**
**Aussois, 16-19 mai 2000**

# SACRAL THEATER,
# un code pour simuler la propagation de la transition de l'aimant supraconducteur LHC Atlas Barrel Toroid

Bernard GASTINEAU

Département d'Astrophysique, de physique des Particules, de physique Nucléaire et de l'Instrumentation Associée / Service des Techniques de Cryogénie et de Magnétisme
CEA/Saclay, Bât.123, F-91191 Gif-Sur-Yvette Cedex
gastinea@hep.saclay.cea.fr Tél. 33 (0)1 69 08 99 54

PACS : 85.25.Ly

## SACRAL THEATER: propagation de la transition dans un aimant supraconducteur

### Résumé

SACRAL THEATER a été développé pour l'aimant toroïdal ATLAS du projet LHC du CERN. Ce code 3D calcule donc la propagation de la transition d'une bobine supraconductrice en hippodrome de longueur 25 m. On a spécialement inclus des procédures permettant l'étude des « bas courants » où le processus se déroule beaucoup plus lentement, en particulier sur ces très grandes bobines (depuis le courant nominal de 20500 A jusqu'à 2000 A) . Ce travail est une partie de l'étude du Système de Sécurité de l'aimant, puisque la protection des bobines est assurée par des chaufferettes déclenchant la propagation du « Quench » en cas de détection de défaut. Ceci permet ainsi la dissipation totale de l'énergie stockée qui peut atteindre 1080 MJ sur ATLAS.

## 1 Introduction

### 1.1 L'aimant toroïdal

Le Toroïde est constitué de 8 bobines indépendantes assemblées en éventail et de façon symétrique autour de la zone centrale du détecteur.

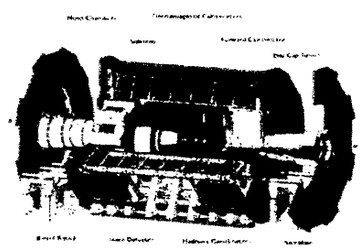


**Figure 1 - Le détecteur ATLAS**

| | ATLAS BT |
|---|---|
| Diamètre intérieur | **9.4 m** |
| Diamètre extérieur | **20.1 m** |
| Longueur axiale | **25.3 m** |
| Nombre de bobines | **8** |
| Ampère tour totaux | **19.7 MA** |
| Energie stockée | **1080 MJ** |
| Courant nominal | **20.5 kA** |
| Champ maximum | **4 T** |

**Tableau 1 - Caractéristiques générales du Toroïde Atlas**

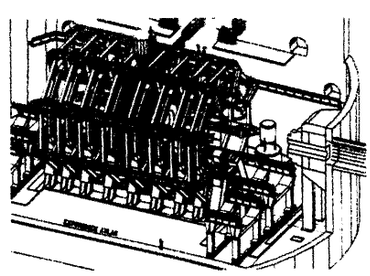


**Figure 2 - L'aimant toroïdal d'ATLAS**

Chaque enroulement est formé de deux doubles galettes planes en forme « d'hippodrome » de 25 mètres de long et 5 mètres de large, placées dans la boîte à bobines.

| | ATLAS BT |
|---|---|
| Longueur bobine | **24.95 m** |
| Largeur bobine | **4.98 m** |
| Épaisseur bobine | **0.29 m** |
| Double galettes | **2** |
| Nombre de tours | **2*30** |
| Section du conducteur | **57*12 mm$^2$** |
| Poids d'une masse froide | **47,5 t** |
| Poids total d'une bobine | **87 t** |
| Force magnétique centripète résultante | **1100 t / bobine** |

**Tableau 2 - Caractéristiques d'une bobine**

### 1.2 Le conducteur supra

Le conducteur choisi est constitué d'un câble supra-conducteur de 38 brins Nb-Ti co-extrudés dans un profilé en aluminium extra-pur, matériau stabilisant présentant une très haute conductivité électrique et thermique.

La section hors-tout de ce conducteur est de 57 x 12 mm$^2$. Les conducteurs sont isolés entre eux par un tissu de verre. De même, dans la boîte à bobines, les doubles galettes sont isolées de la masse. Et le tout

est imprégné, sous vide, de résine époxy.

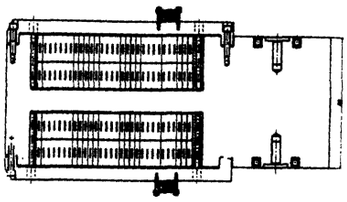


**Figure 3 –**
**Section de la masse froide**

## 1.3 Le circuit électrique

L'alimentation électrique délivre 21 kA aux bobines mises en série, et l'énergie stockée peut donc atteindre au total 1080 MJ.

Le principe de la protection de l'aimant est la décharge interne de l'énergie par le déclenchement volontaire de la transition des bobines supraconductrices à l'état nomal. La fiabilité des chaufferettes résistives doit être parfaite.

La température par échauffement adiabatique homogène est de 85 K La température maximum admise après décharge rapide est de 100 K.

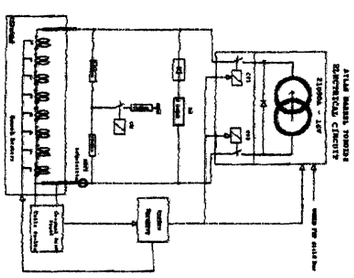


**Figure 3 - Circuit électrique**

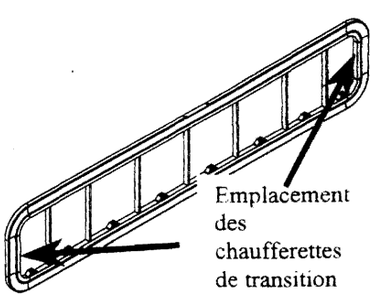



**Figure 4 - Boîte froide Atlas BT**

## 1.4 Chaufferettes de protection: déclenchement et propagation de la transition

La chaufferette de transition (100 w) se situe sous le premier conducteur, au milieu de celui-ci.

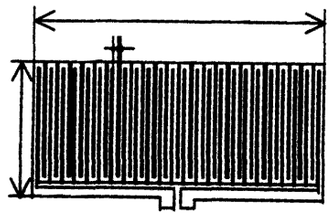


**Figure 5 - Chaufferette résistive (Inox 50x11 cm2)**

### 1.4.1 Au courant nominal

- Le diagramme donne le calcul de l'instant de la transition à l'état normal le long de chaque tour (1 à 30).
- A 20500 A, la bobine transite entièrement en 4.5 s.
- La propagation est à la fois transverse et longitudinale.
- L'évaporation de l'hélium diphasique stationnant dans les tuyaux nécessite 115 000 J. Mais 6 secondes suffisent pour évaporer totalement cet hélium.
- Le calcul donne aussi les températures minimum (4.6 K) et maximum de la bobine et de sa boîte support.

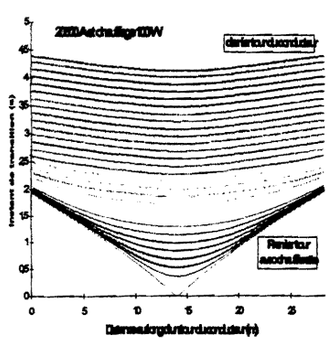


**Figure 6 - Propagation de la transition au courant nominal**

### 1.4.2 A bas courant

- A bas courant (2000 A), la marge enthalpique du conducteur est grande et l'effet Joule petit. L'évaporation de l'hélium joue alors un rôle prépondérant.
- Environ 150 s sont nécessaires pour évaporer l'hélium avant le départ de la propagation de la transition.
- La transition complète de la bobine nécessite 160 s de plus.
- La durée de la transition complète décroît exponentiellement avec le courant de la bobine (de plus de 300 s à environ 5 s, depuis 2000 A jusqu'à 20500 A).

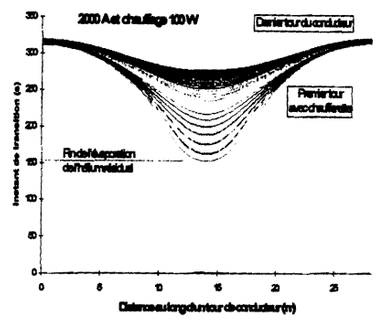


**Figure 6 - Propagation de la transition à bas courant**

## 1.5 Conclusion

Ce code, qui est un développement du code originel RALTRAN, (Sac.Ral T.Heater est le condensé de 'Saclay & RAL Toroid Heater') intègre les caractéristiques suivantes, pour calculer Atlas BT:

- Propriétés des matériaux dépendantes de la température.
- Introduction de la chaleur spécifique de l'isolation.
- Introduction de la conduction longitudinale de la boîte froide.
- Décroissance du courant selon la résistance réelle de la bobine.
- Algorithme d'accélération du pas de calcul (rapidité et précision à bas courant)
- Puissance supplémentaire due au courant de diffusion *(données F.P.Juster)*

## 1.6 Remerciements

L'auteur remercie ses collegues du Dapnia / Stcm :

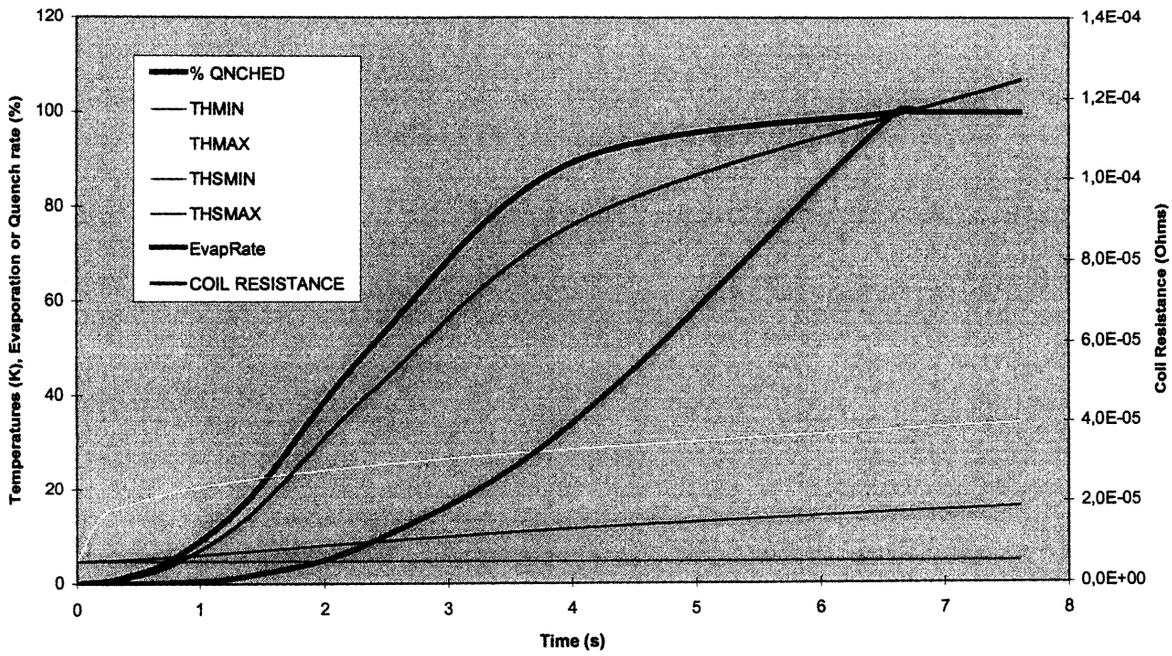
- Claude Lesmond pour ses connaissances sur la protection des aimants supraconducteurs et le programme « Transit » .
- F.P.Juster pour ses données et considérations sur la diffusion du courant dans un conducteur supra après transition.

Le programme de développement du détecteur ATLAS pour le LHC du CERN est financé majoritairement par la Collaboration ATLAS qui associe environ 145 instituts de recherche dans 34 pays.

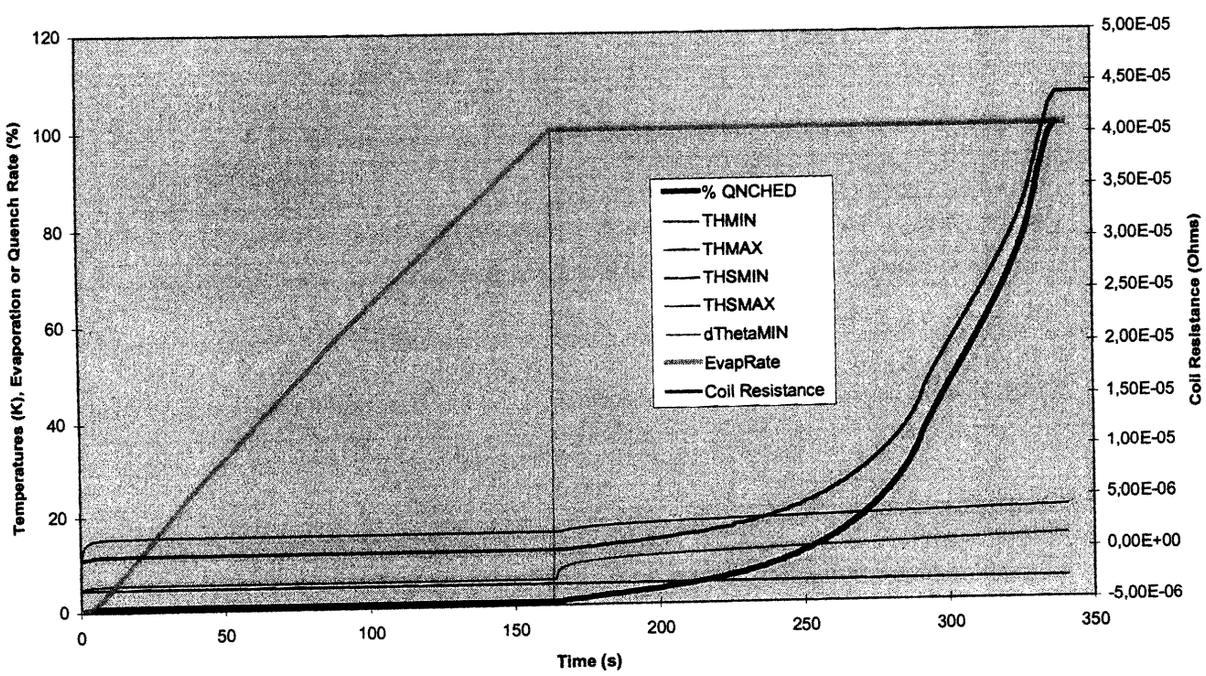
## 1.7 Référence

B.Gastineau, M.Courtold and C.Lesmond, « Study of Heater efficiency in the Atlas Barrel Toroid Magnet » International Cryogenic Engineering Conference, p 479-485 ICEC 17, Bournemouth, UK, 14-17 July 1998

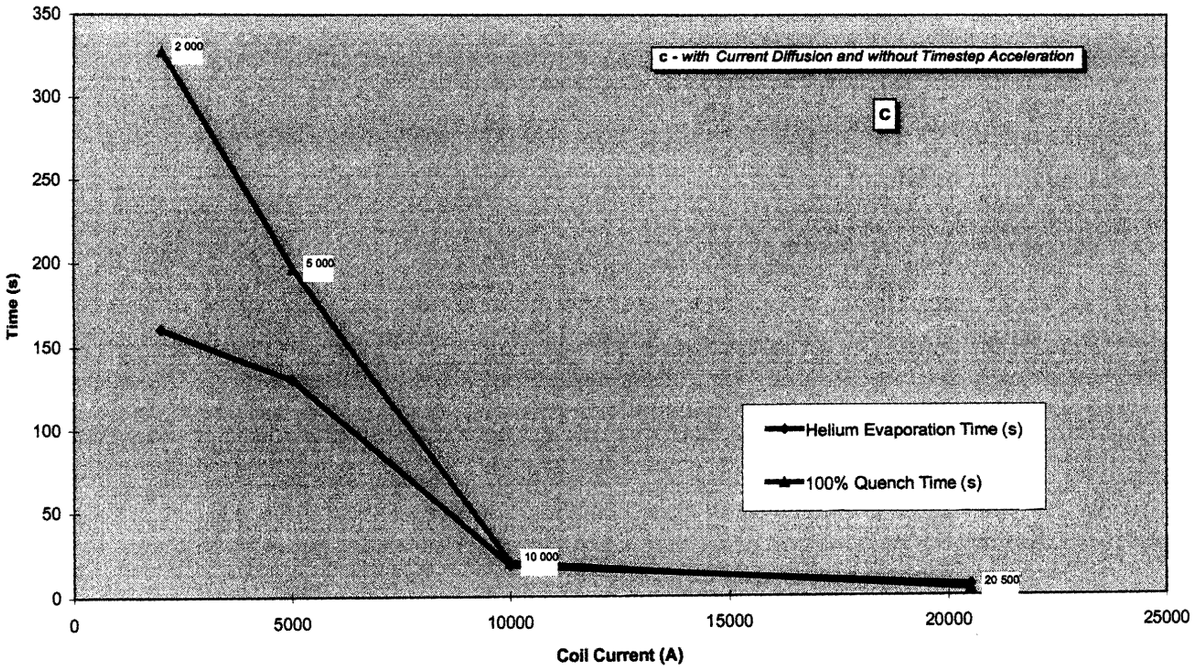
**Percentage of Quenched Coil versus Time ( I = 20 kA)**



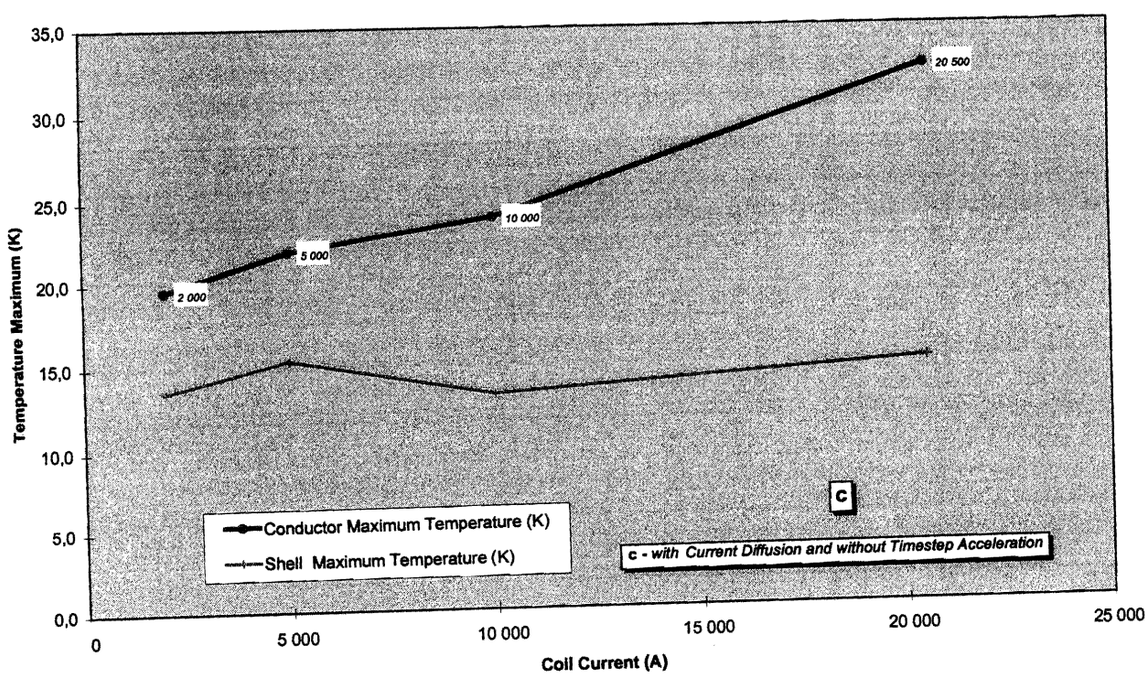

**Percentage of Quenched Coil versus Time ( I = 2 kA)**

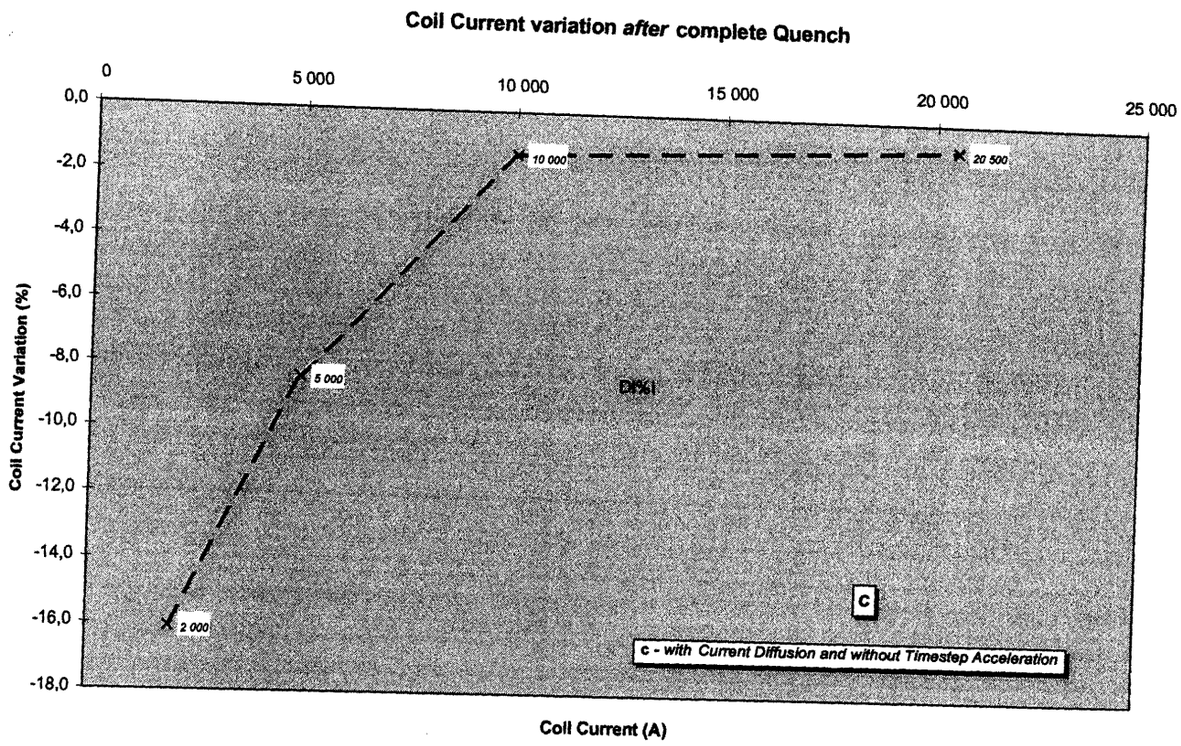


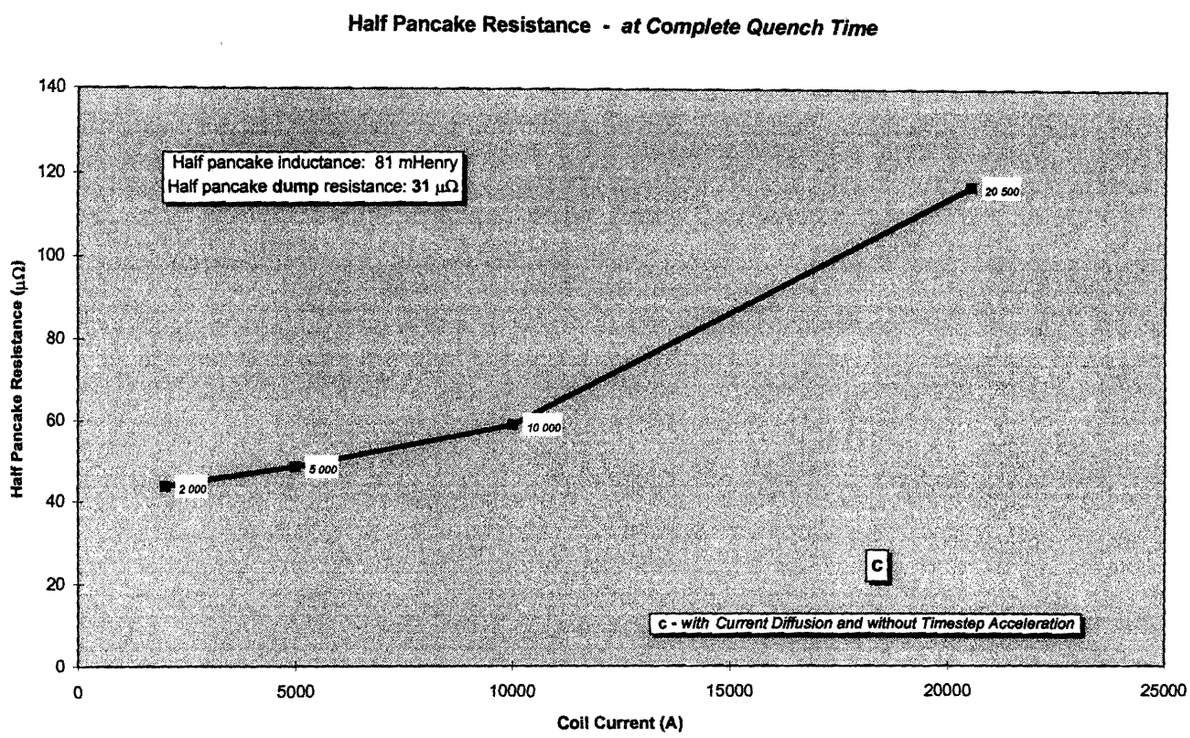
**Complete Coil Quench Time *and* Evaporation Time *versus* Coil Current**

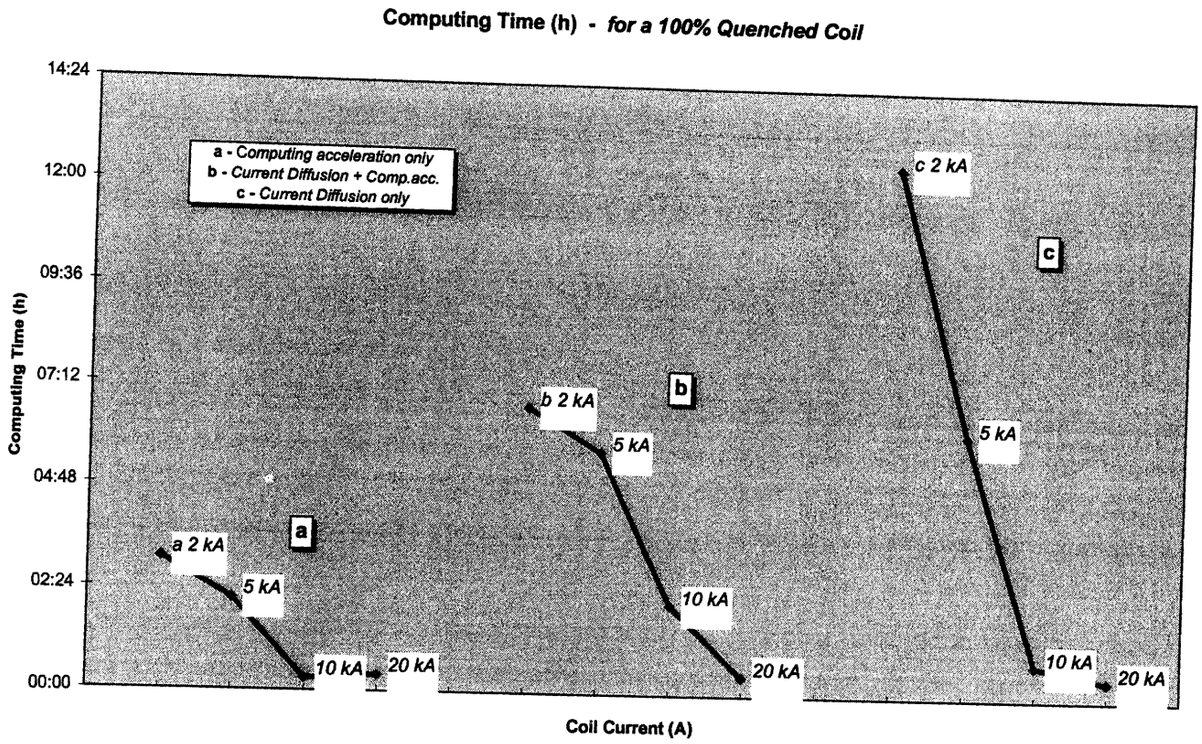


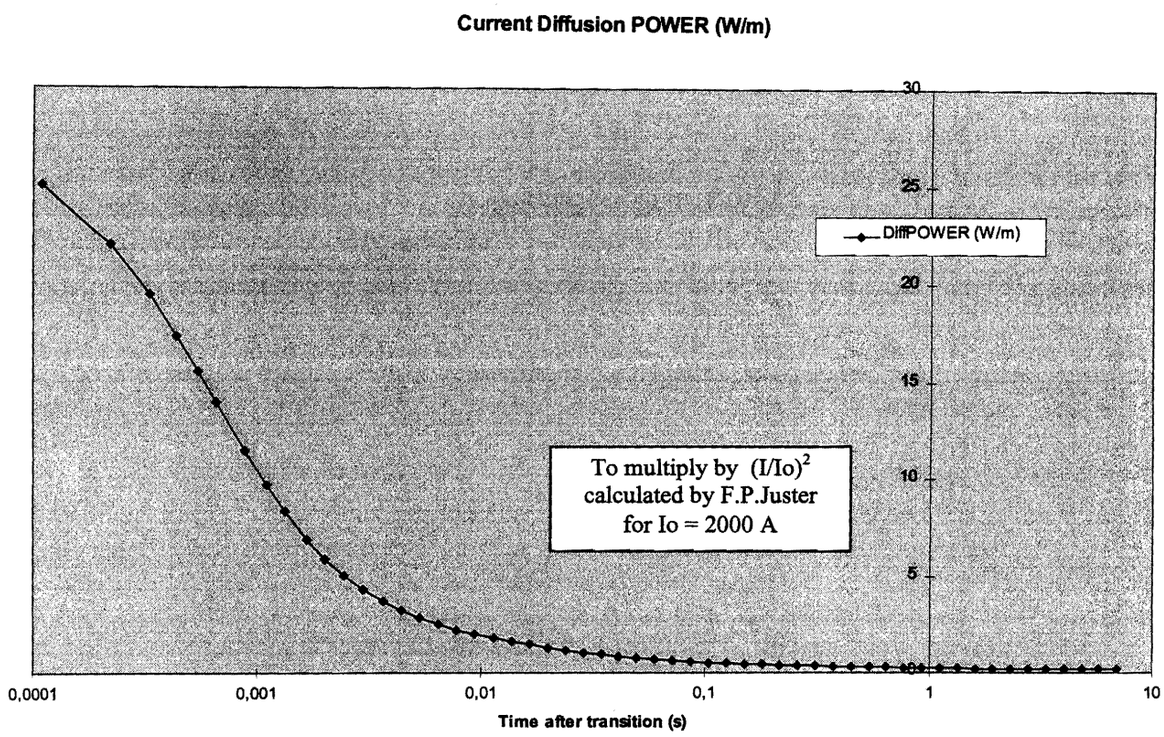

**Temperature Maxima - *at Complete Quench Time***

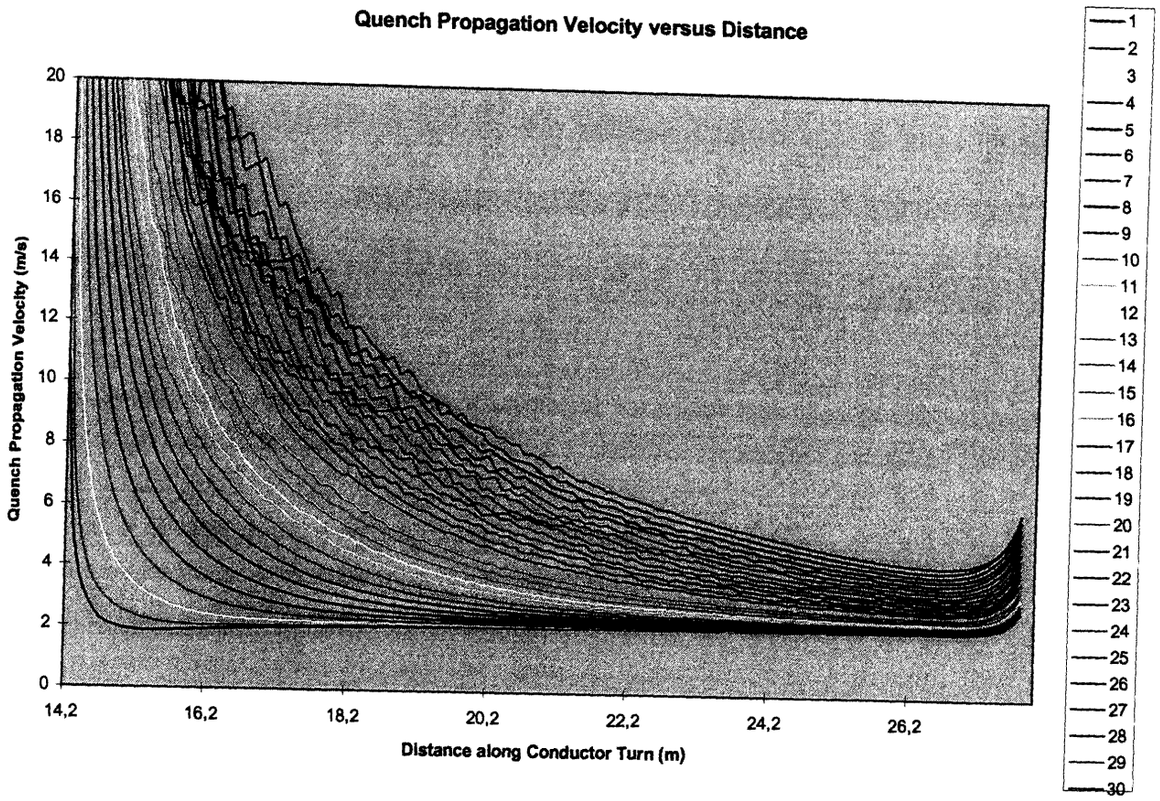


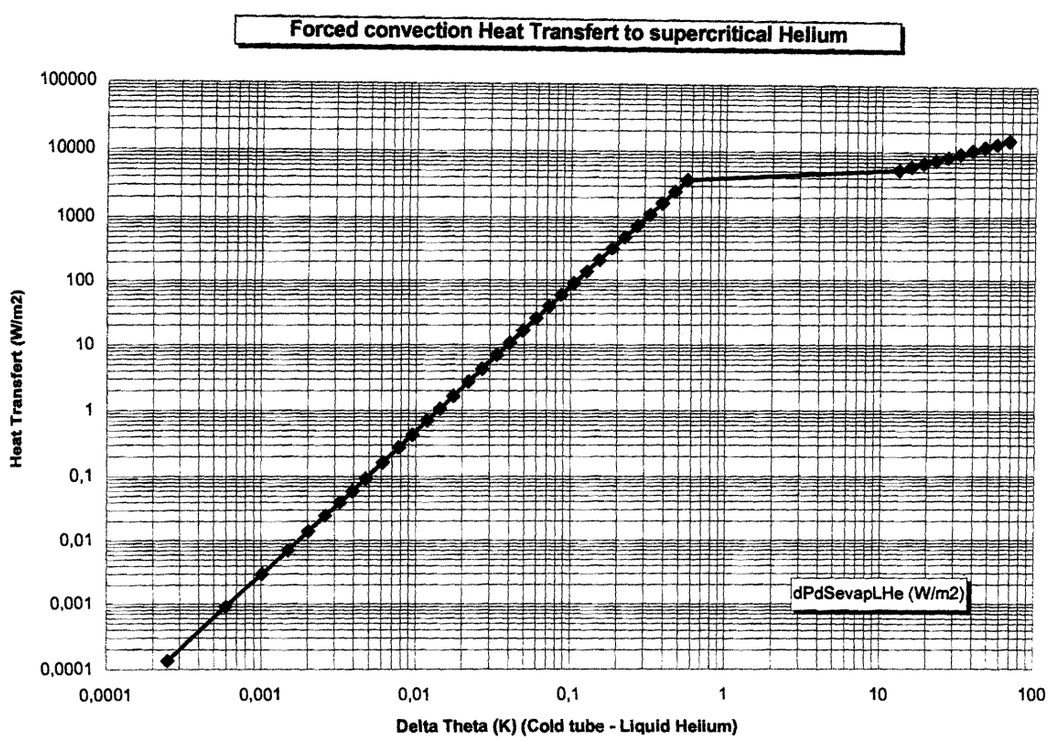

Coil Current variation *after* complete Quench
0
5 000
10 000
15 000
20 000
25 000
0,0
-2,0
-4,0
-6,0
-8,0
-10,0
-12,0
-14,0
-16,0
-18,0
Coil Current Variation (%)
10 000
20 500
5 000
2 000
c
c - with Current Diffusion and without Timestep Acceleration
Coil Current (A)

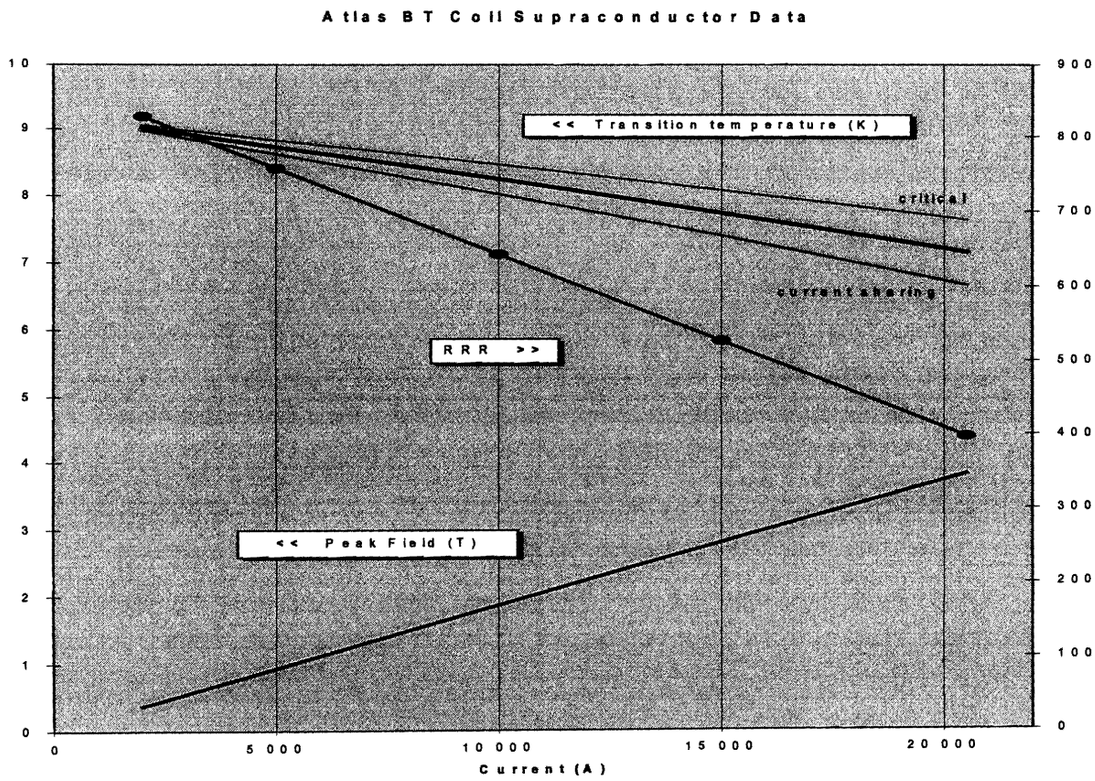

Half Pancake Resistance - *at Complete Quench Time*
140
120
100
80
60
40
20
0
Half Pancake Resistance (μΩ)
Half pancake inductance: 81 mHenry
Half pancake dump resistance: 31 μΩ
20 500
10 000
5 000
2 000
c
c - with Current Diffusion and without Timestep Acceleration
0
5000
10000
15000
20000
25000
Coil Current (A)

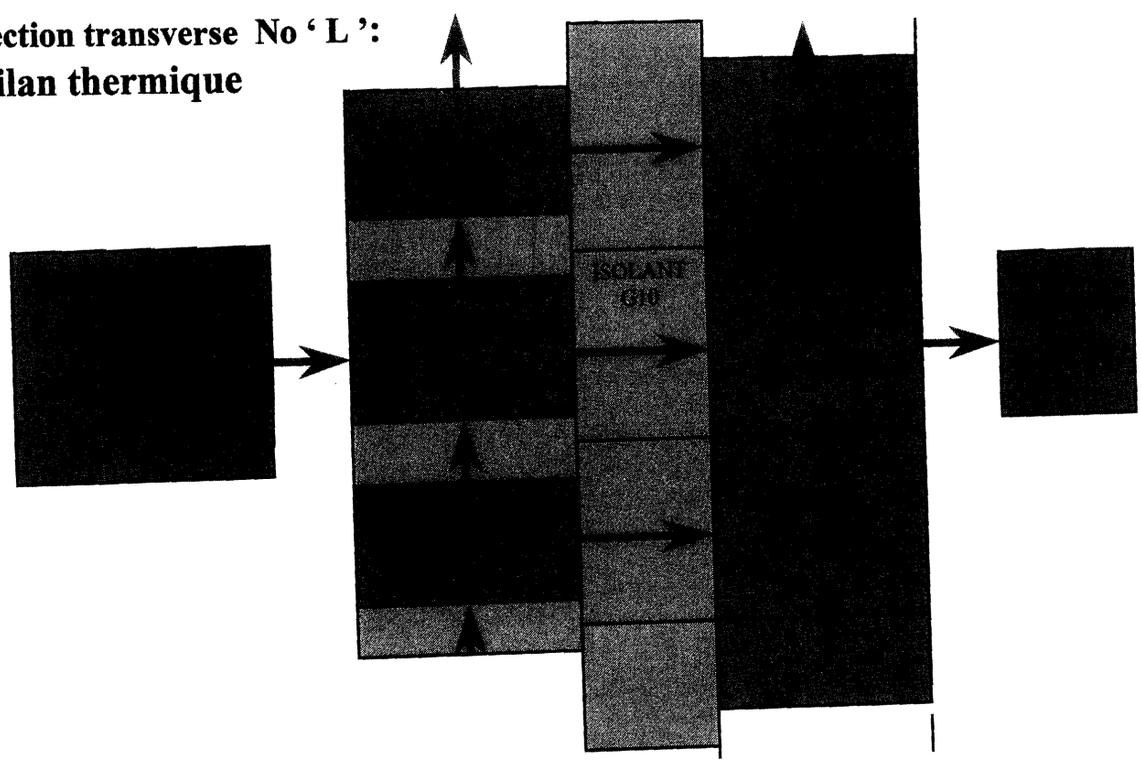

Computing Time (h) - for a 100% Quenched Coil
14:24
12:00
09:36
07:12
04:48
02:24
00:00
Computing Time (h)
a - Computing acceleration only
b - Current Diffusion + Comp.acc.
c - Current Diffusion only
a 2 kA
5 kA
10 kA
20 kA
a
b 2 kA
5 kA
10 kA
20 kA
b
c 2 kA
5 kA
10 kA
20 kA
c
Coil Current (A)


Current Diffusion POWER (W/m)
30
25
20
15
10
5
DiffPOWER (W/m)
To multiply by (I/Io)$^2$
calculated by F.P.Juster
for Io = 2000 A
0,0001
0,001
0,01
0,1
1
10
Time after transition (s)


Quench Propagation Velocity versus Distance
Quench Propagation Velocity (m/s)
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
14,2
16,2
18,2
20,2
22,2
24,2
26,2
Distance along Conductor Turn (m)
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30


Forced convection Heat Transfert to supercritical Helium
Heat Transfert (W/m2)
100000
10000
1000
100
10
1
0,1
0,01
0,001
0,0001
0,0001
0,001
0,01
0,1
1
10
100
Delta Theta (K) (Cold tube - Liquid Helium)
dPdSevapLHe (W/m2)




**Section transverse No ' L ':**
**Bilan thermique**