117

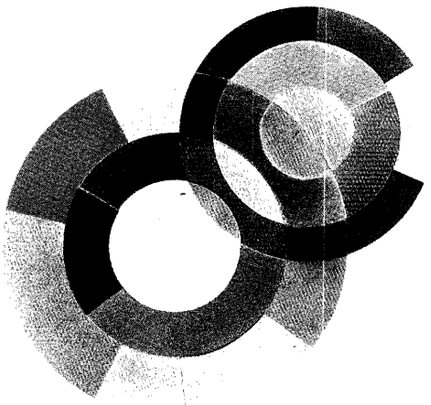
CEA/SACLAY
DSM

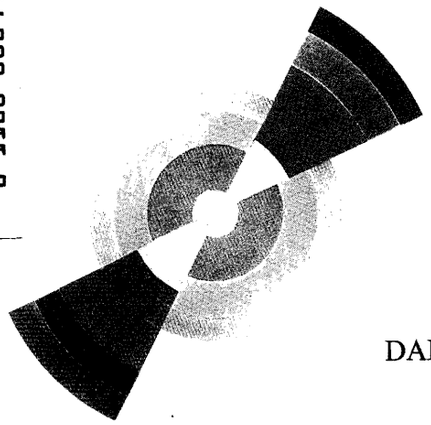
SERVICE TECHNIQUE DE CRYOGÉNIE ET DE MAGNÉTISME

FERMILAB
OCT 16 2000
LIBRARY

DAPNIA - STCM - 00 - 06

Fermilab Library
0 1160 0069928 4





DAPNIA/STCM-00-06 Mai 2000

MOTIVATION SCIENTIFIQUE DU PROJET DE THESE
SUR LA STABILITE

(CSTS du 26 avril 2000)

DAPNIA

**B. Baudouy, A. Devred, F.P. Juster, P. Tixador,
F. Trillaud, C. Verwaerde**

Département d'**A**strophysique, de Physique des **P**articules, de Physique **N**ucléaire et de l'**I**nstrumentation **A**ssociée
CEA/Saclay F-91191 Gif-sur-Yvette Cédex

Couverture : Sylvie Cabrit et Marc Sauvage

Sommaire

I. Introduction et Positionnement : A. Devred

II. Présentation Alstom : confidentiel

III. Présentation de l'étude expérimental : B. Baudouy

IV. Mise en œuvre du dispositif expérimental et premiers essais : F. Trillaud

V. **Conclusion :** P. Tixador

I. Introduction et Positionnement

A. Devred

Motivation Scientifique du Nouveau Projet d'Accord de Collaboration avec Alstom et de la Proposition de Thèse sur la Stabilité des Brins Supraconducteurs

---

Introduction et Positionnement

A. Devred, B. Baudouy, F.P. Juster, F. Trillaud

CSTS « élargi » du 26 avril 2000

DSM - DAPNIA STCM

Remerciements

A. Anton (consultant)
L. Bacquart (sc)
B. Baudouy
P. Bredy
C.E. Bruzek (Alcatel Câbles)
M. Cazanou
S. Cazaux
G. Curnier (stagiaire Supélec)
T. Dechambre
J.L. Duchateau et le DRFC/STEP
M. Durante
A. Forgeas
B. Gallet
R. Gaubert
C. Génin
C. Gourdin
G. Grünblatt et Alstom/MSA/Fils
F.P. Juster
G. Lemierre
C. Mangeant (stagiaire Supélec)
M. Masson (SGPI)
C. Nicolleau
R. Otmani
J.C. Paladji
G. Perrin (stagiaire FIUPSO)
J.L. Peyrat
M. Peyrot
M. Poinsot
A. Poupel
A.M. Puech
J.M. Rey
M. Reytier
J.M. Rifflet
S. Sanchez (sc)
T. Schild
F. Streiff (sc)
P. Tixador (CNRS et INPG)
F. Trillaud (stagiaire ESTP)
P. Védrine

Plan

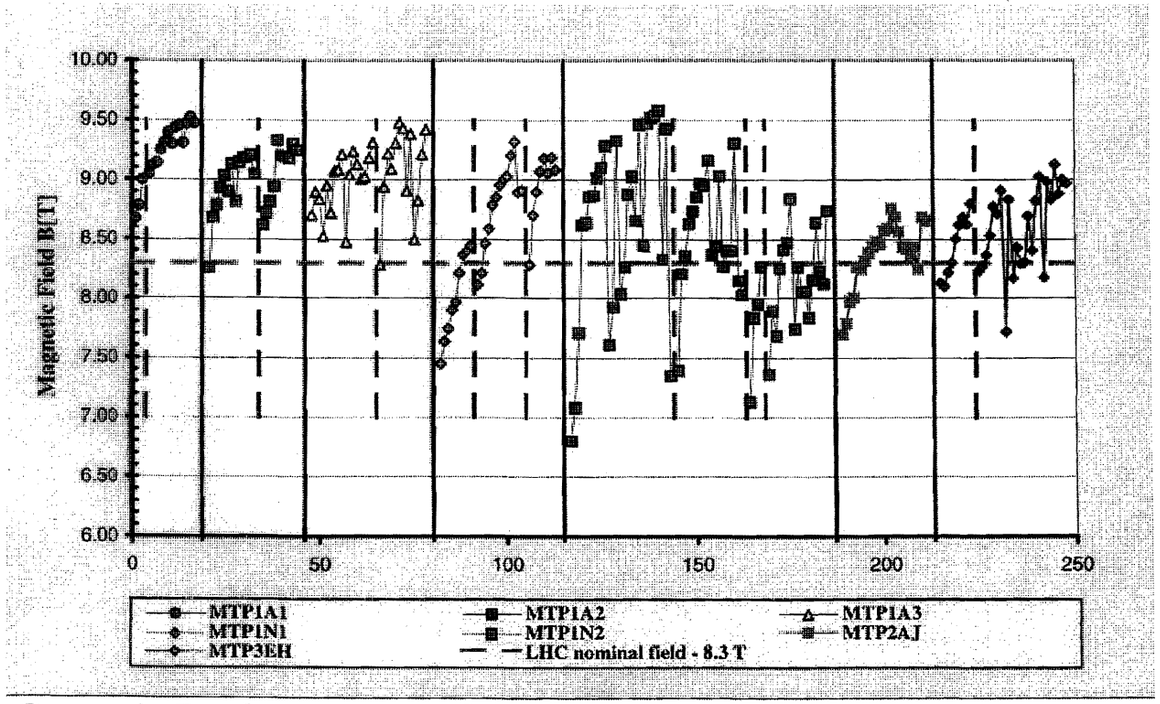
- Rappels sur le Nb_3Sn
- Bref Historique du Programme Nb_3Sn Lancé en 1995
- Etat d'Avancement du Programme Nb_3Sn
- Bilan du Premier Accord de Collaboration avec Alstom et de la thèse de R. Otmani
- Etat de l'Art sur le Nb_3Sn en 2000
- Nouvelles Demandes du Projet TESLA
- Nouveau Projet d'Accord de Collaboration avec Alstom et Nouveau Sujet de Thèse
- Perspectives

Plan

- Rappels sur le Nb_3Sn
- Bref Historique du Programme Nb_3Sn Lancé en 1995
- Etat d'Avancement du Programme Nb_3Sn
- Bilan du Premier Accord de Collaboration avec Alstom et de la thèse de R. Otmani
- Etat de l'Art sur le Nb_3Sn en 2000
- Nouvelles Demandes du Projet TESLA
- Nouveau Projet d'Accord de Collaboration avec Alstom et Nouveau Sujet de Thèse
- Perspectives

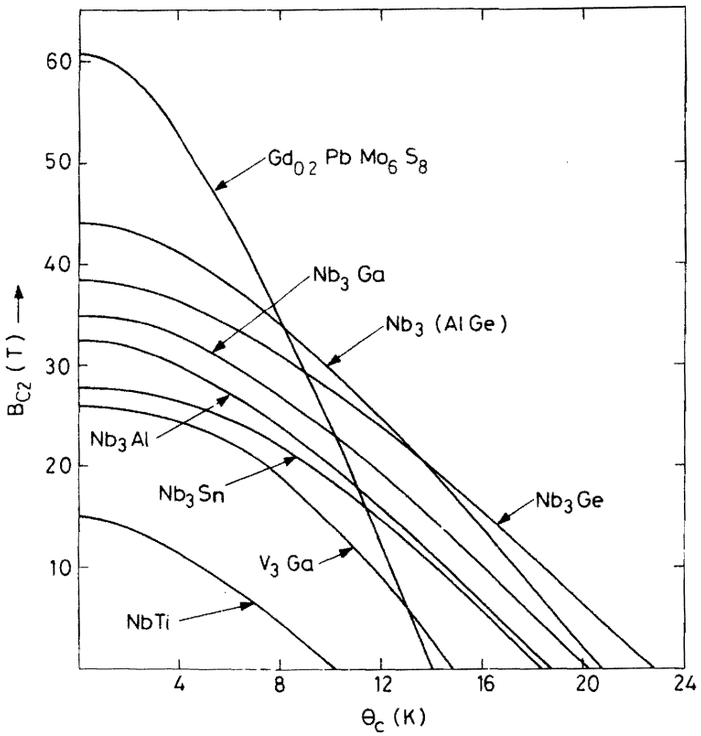
Pourquoi le Nb_3Sn ?

- Le programme de R&D sur les dipôles LHC du CERN a montré qu'il était difficile d'atteindre 10 T avec le NbTi à 1.8 K



Quench Performance of 10-m-Long, 50-mm-Twin-Aperture LHC Dipole Magnet Prototypes (Courtesy A. Siemko)

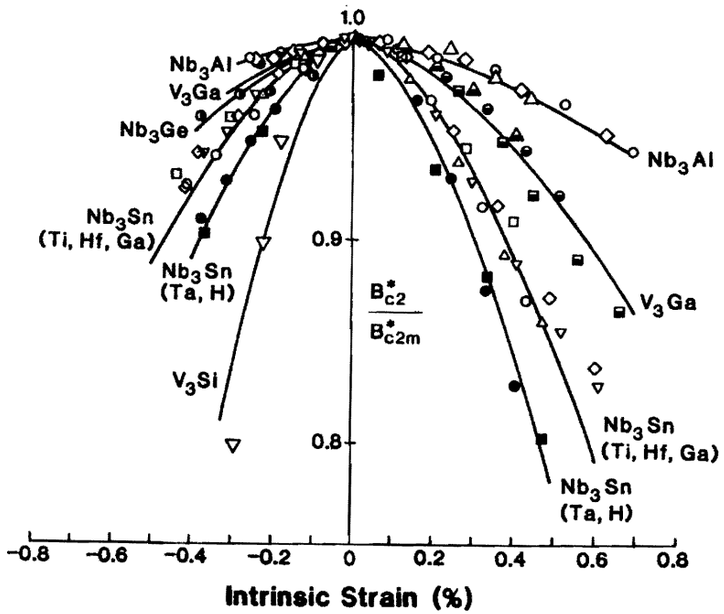
Pourquoi le Nb_3Sn ? (suite)



(d'après M.N. Wilson, 1983)

- Pour s'ouvrir une nouvelle gamme d'inductions (10-15 T) il faut donc changer de matériau
- Le seul autre matériau supra ayant des propriétés supérieures au NbTi et pouvant être produit de manière quasi-industrielle est le Nb_3Sn

Problèmes de Mise en Œuvre du Nb_3Sn



(d'après J.W. Ekin, 1984)

- Le Nb_3Sn possède de bonnes propriétés (température critique de 18 K à 0 T et champ critique de seconde espèce de l 'ordre de 23 T à 4.2 K)

mais

- une fois formé, il devient fragile
- ses propriétés dépendent du taux de déformation

⇒ Il faut repenser les procédés de fabrication du brin, du câble et de l'aimant

Principes de Fabrication des Brins Nb_3Sn

- Le Nb_3Sn est connu depuis plus longtemps que NbTi, mais les difficultés de mise en œuvre ont toujours été un obstacle à son développement
- Les brins composites multifilamentaires à base de Nb_3Sn sont fabriqués en trois étapes :

  (1) assemblage d'une billette constituée de précurseurs du Nb_3Sn arrangés dans une matrice métallique,

  (2) filage et étirage de la billette (en limitant les échauffements), jusqu'à obtenir le brin de section désirée

  (3) traitement thermique du brin (éventuellement après câblage et/ou bobinage), sous vide ou en atmosphère inerte, pour former le composé Nb_3Sn

Arrangements de Billettes Nb_3Sn

- Trois types d'arrangements de billettes sont présentement utilisés pour la production de brins Nb_3Sn

  (1) Méthode du Bronze : filaments de Nb disposés dans une matrice de bronze (qui sert de réservoir d'étain)

  (2) Méthode de l'Etain Interne : filaments de Nb disposés dans une matrice de cuivre autour de piscines d'étain

  (3) Méthode du « Powder in Tube » : poudres de Nb_2Sn compactées dans des tubes de Nb disposés dans une matrice de cuivre

NB : les filaments de Nb sont en général dopés au Ti ou au Ta

Comparaison des Différentes Méthode de Production des brins Nb_3Sn

- Méthode du Bronze : limitation inhérente à la quantité d'étain dans le bronze (~15% en poids)

  $\Rightarrow$ Faible J_c, mais possibilité d 'obtenir de petits diamètres effectifs

- Méthode de l'étain interne : les piscines d'étain sont dimensionnées pour permettre la réaction complète de tous les filaments, mais les temps de diffusion peuvent être très longs + risques de pontages

  $\Rightarrow$ Fort J_c, mais difficile de contrôler les diamètres effectifs

- Méthode du « Powder in Tube » : revient à avoir une piscine d'étain au cœur de chaque filament

  $\Rightarrow$ Fort J_c, bon contrôle des diamètres effectifs, mais coûts de production élevés

Principaux Fabricants de Brins Nb_3Sn dans le Monde (en 2000)

- Méthode du Bronze :
  Bochvar, Furukawa, Hitachi, Kobe Steel, Vac

- Méthode de l 'étain interne :
  Alstom, Europa Metalli, IGC, Mitsubishi, OST (brevet MJR racheté à TWCA)

- Méthode du « Powder in Tube » :
  SMI (brevet ECN), Supercon (R&D)

Plan

- Rappels sur le Nb_3Sn
- Bref Historique du Programme Nb_3Sn Lancé en 1995
- Etat d'Avancement du Programme Nb_3Sn
- Bilan du Premier Accord de Collaboration avec Alstom et de la thèse de R. Otmani
- Etat de l'Art sur le Nb_3Sn en 2000
- Nouvelles Demandes du projet TESLA
- Nouveau Projet d'Accord de Collaboration avec Alstom et Nouveau Sujet de Thèse
- Perspectives

R&D sur le Nb_3Sn au STCM

- Lors d'un CSTS tenu le 25 octobre 1995, le STCM a proposé un programme de R&D sur le Nb_3Sn
- Le programme a été approuvé en Comité de Réalisation le 12 décembre 1995 et la Lettre-Projet a été issue le 15 février 1996
- Ce programme avait pour but la construction, dans les trois ans, d'un quadripôle modèle en Nb_3Sn
- Il était assorti d'un Accord de Collaboration avec Asltom pour le développement du brin et du câble Nb_3Sn et d'un contrat de thèse co-financé de type CTCI

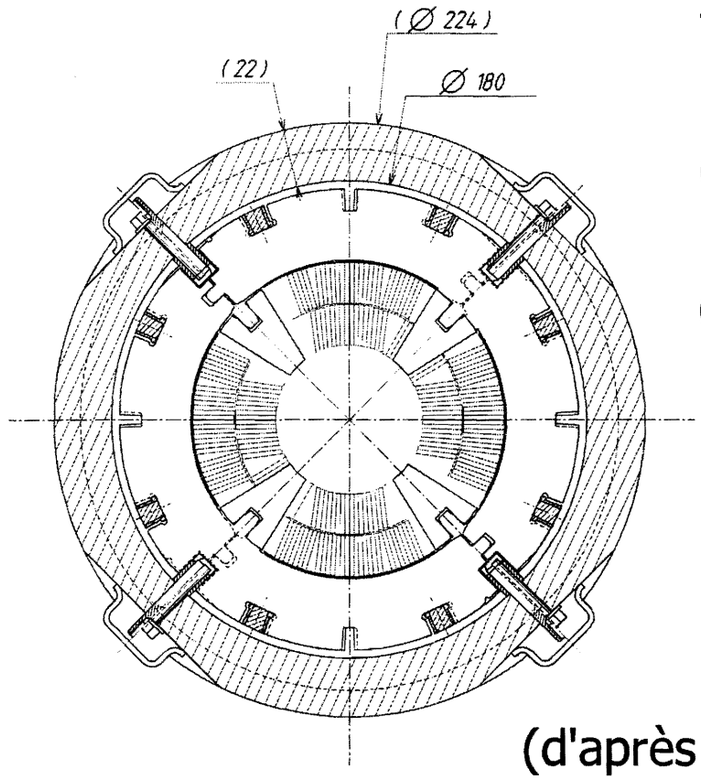
Design de Base du Quadripôle en Nb_3Sn

• Le design de base du quadripôle modèle en Nb_3Sn est basé sur celui des quadripôles LHC en NbTi

Une seule ouverture de 56 mm

Longueur de l 'ordre de 1 m

Pas de fer



Température(s) :
4.2 K et 1.9 K

Gradient nominal :
213 T/m

Courant nominal :
~12000 A

(d'après J. Thinel)

Options de Base dans la Fabrication du Quadripôle Modèle en Nb_3Sn

La technique choisie pour la fabrication du quadripôle modèle est celle du « wind, react, & impregnate »

Les principales étapes en sont :

- Filage et étirage du brin et câblage
- Guipage du câble non-réagi à l'aide d'un ruban de fibres minérales (ou céramiques) désensimé
- Bobinage du câble guipé
- Traitement thermique du bobinage en atmosphère inerte pour former le composé Nb_3Sn
- Imprégnation de résine sous vide du bobinage réagi

Modalités du Premier Accord de Collaboration avec Alstom (Tâche Câble)

- L'Accord de Collaboration était assorti d 'un contrat de thèse de type CTCI cofinancé à 50/50
- Alstom s'engageait à prendre en charge les coûts du programme de R&D mené à Belfort
- Le CEA s'engageait à prendre en charge les coûts du programme de R&D mené à Saclay
- Alstom s'engageait à produire la longueur câble nécessaire à la réalisation du quadripôle modèle (5 x 60 m) et le CEA s'engageait à verser une somme forfaitaire de 250 000 FF, qui correspondait à une estimation du coût du marché pour les 300 m de câble

Etablissement du Cahier des Charges pour le Premier Accord de Collaboration

- A l'époque, l'application envisagée était les aimants des régions d'interaction d'une machine de type LHC pour lesquelles les distorsions de champ résultant de l'aimantation du supraconducteur doivent être faibles

- Après consultation avec P. Schmüser (DESY), un objectif de 15 à 20 μm a été fixé pour le diamètre effectif des filaments

- La spécification sur J_C a été établie en faisant un bilan des programmes de R&D de l'époque

Etat de l'Art sur les Brins Nb_3Sn en 1995

- Gros efforts de R&D commandités par ITER en vue de la production de deux types de brins :

Type	J_C à 4.2 K et 12 T (A/mm^2-non-Cu)	Pertes par Hyst. pour un cycle ± 3 T (mJ/cm^3-non-Cu)	Quantité (tonnes)
High Perf. I	700	600	6.5
High Perf. II	550	200	16.5

- Europa Mettalli, IGC et TWCA sont qualifiés pour la production du brin HPI, et Bochvar, Furukawa, Hitachi, Mitsubishi, et Vac sont qualifiés pour la production du brin HPII

Etat de l'Art sur les Brins Nb_3Sn en 1995 (Suite)

- IGC (méthode de l 'étain interne) se distingue par l'obtention de J_C assez élevée (> 700 A/mm^2 à 4.2 K et 12 T) avec un niveau de pertes assez faible (< 500 mJ/cm^3 pour un cycle $\pm$ 3 T)
- Très bons résultats obtenus par ECN (méthode du « Powder in Tube ») avec un J_C record de ~1350 A/mm^2 à 4.2 K et 12 T, mais la production a été arrêtée en 1992 pour cause de restructuration

$\Rightarrow$ La méthode de production utilisée par Alstom étant proche de celle utilisée par IGC, l 'objectif de 700 A/mm^2 à 4.2 K et 12 T a été retenu

- Ce plan de charges, présenté au CSTS et au Comité de Réalisation de 1995, prévoyait :

  – l'embauche immédiate d'un(e) CTE

  – un soutient important de l'équipe des quadripôles LHC (J.M. Rifflet, M. Peyrot, P. Védrine au STCM et M. Masson et J. Thinel au SGPI)

Spécifications du Conducteur Nb_3Sn pour le Premier Accord de Collaboration

- Spécifications du brin :

  $I_C \geq 405$ A à 4.2 K et 7 T et Pertes ≤ 450 mJ/cm^3

  (ce qui, avec un diamètre de 0.825 mm et un rapport cuivre-sur-non-cuivre de 1.4 sur 1 conduit à un J_C de ~700 A/mm^2 à 4.2 K et 12 T et un diamètre effectif de ~18 μm)

- État de l'Art sur le Nb_3Sn en 2000
- Nouvelles Demandes du projet TESLA
- Nouveau Projet d'Accord de Collaboration avec Alstom et Nouveau Sujet de Thèse
- Perspectives

Bilan Humain (Prévu/Réel en H.an)

(Préparé par M. Gagné)

	1996	1997	1998	1999	Total	Δ
CTE	1.0/0.0	1.0/0.0	1.0/1.0	0.0/0.4	3.0/1.4	–1.6
Devred	0.8/0.6	0.8/1.0	0.8/0.9	0.3/0.5	2.7/3.1	+0.4
Peyrot	0.3/0.2	0.2/0.1	0.3/0.0	0.1/0.0	0.9/0.3	–0.6

Bilan Humain (suite)

- CTE embauché(e) avec 2 ans de retard
  (dû à l'extrême lenteur de l'administration à recruter un candidat américain très motivé, qui, devenu jeune papa et sur le point d'être licencié est allé chercher du travail ailleurs)
- Déficit cumulé de ~3 H.an de la part de l'équipe des quadripôles LHC (STCM + SGPI)
  (dû à un étalement et une consommation de main d'œuvre plus grande que prévue par le projet de quadripôles LHC)

Conséquences du Déficit de Ressources Humaines

- Les calculs de conception mécanique du quadripôle modèle n'ont démarré qu'en septembre 1999 avec l'arrivée de C. Gourdin
- Le travail du Bureau d'Etudes vient juste de commencer
- Le programme de réalisation a accumulé un retard de plusieurs années (entre 3 et 4 ans)

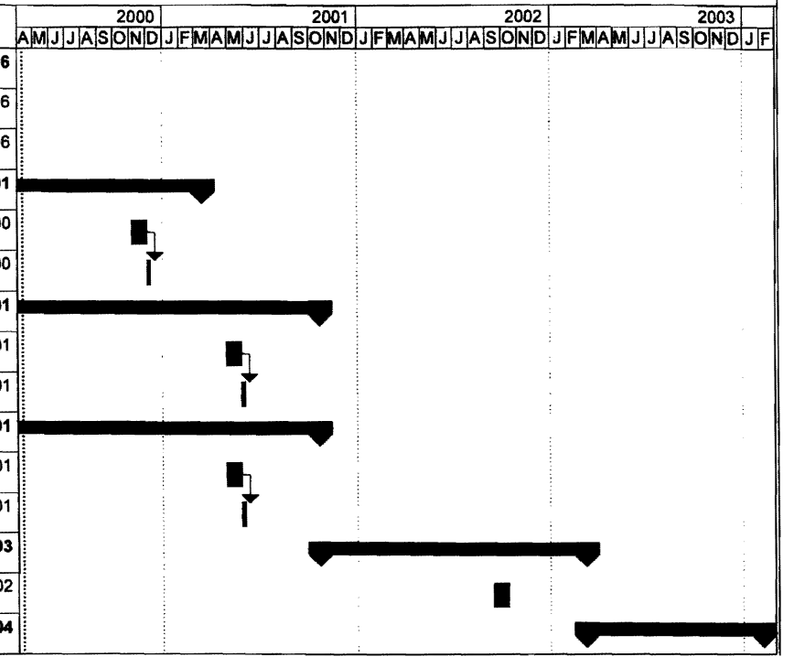
Planning Réactualisé

(préparé par M. Durante et C. Gourdin)

- Le planning du programme Nb_3Sn vient d'être réactualisé (cette réactualisation suppose des ressources humaines adéquates)

Planning détaillé du Quadripole Nb3Sn — 5- 2650N -- 0420 011

N°		Nom de la tâche	Durée	Début	Fin
1	✓	**Design Conceptuel**	**12 sms**	**Mer 03/01/96**	**Mer 27/03/96**
9	✓	Proposition technique préliminaire	1 sm	Mer 27/03/96	Mer 03/04/96
10	✓	IDR	1 sm	Mer 03/04/96	Mer 10/04/96
11		**Etudes Techniques**	**271.59 sms**	**Mer 03/01/96**	**Ven 16/03/01**
89		Proposition technique EDR	4 sms	Lun 06/11/00	Lun 04/12/00
90		EDR	1 sm	Lun 04/12/00	Lun 11/12/00
91		**Etudes et Réalisation prototype**	**94.61 sms**	**Mer 29/12/99**	**Lun 22/10/01**
245		Proposition technique PRR	4 sms	Lun 30/04/01	Lun 28/05/01
246		PRR	1 sm	Lun 28/05/01	Lun 04/06/01
247		**Etudes Essais à froid**	**85.6 sms**	**Mer 01/03/00**	**Lun 22/10/01**
282		Proposition technique EDR Station Essais	4 sms	Lun 30/04/01	Lun 28/05/01
283		EDR Station d'essais	1 sm	Lun 28/05/01	Lun 04/06/01
284		**Fabrication prototype**	**72 sms**	**Lun 22/10/01**	**Lun 10/03/03**
341		Mesures Vamas de contrôle	4 sms	Lun 16/09/02	Lun 14/10/02
342		**Essais à froid**	**48 sms**	**Lun 10/03/03**	**Lun 09/02/04**



Dates Clés du Planning Réactualisé

- « Engineering Design Review » pour sanctionner la fin des études de conception de la masse froide le 04/12/2000
- « Production Readiness Review » pour sanctionner la fin des études de détail de la masse froide et des outillages le 28/05/2001
- Validation des outillages : à partir du 22/10/2001 (8 mois)
- Fabrications de 5 pôles Nb_3Sn : à partir du 25/03/2002 (8 mois)
- Frettage du quadripôle : à partir du 23/09/2002 (1 mois)
- Mise en place du tube d'inertie : à partir du 16/12/2002
- Mise à disposition pour les essais à froid : à partir du 10/02/2003

Tâches Accomplies au 26/04/2000

- En dépit du déficit de ressources humaines, un certain nombre de tâches ont été menées à leur terme

- Parmi elles :

  – Le développement, en collaboration avec Alstom, d'un câble satisfaisant au cahier des charges (thèse de R. Otmani)

  – Le développement d'un ruban de fibres de silice de faible épaisseur pour le guipage du câble (contrats CIES puis CTE de M. Durante)

Plan

- Rappels sur le Nb_3Sn
- Bref Historique du Programme Nb_3Sn Lancé en 1995
- Etat d 'Avancement du Programme Nb_3Sn
- Bilan du Premier Accord de Collaboration avec Alstom et de la thèse de R. Otmani
- Etat de l 'Art sur le Nb_3Sn en 2000
- Nouvelles Demandes du projet TESLA
- Nouveau Projet d'Accord de Collaboration avec Alstom et Nouveau Sujet de Thèse
- Perspectives

Contenu Scientifique de la Thèse de R. Otmani

- Initialement, la thèse de R. Otmani devait couvrir la conception et la réalisation du quadripôle modèle

- Vu les délais accumulés par le programme Nb_3Sn, le sujet a été progressivement réorienté vers le développement du brin et du câble

- Au final, le cœur de la thèse est constitué des études de comportement du câble en champ variable (modèles et mesures de résistances interbrin et de pertes)

Répartition des Tâches entre Alstom et le CEA

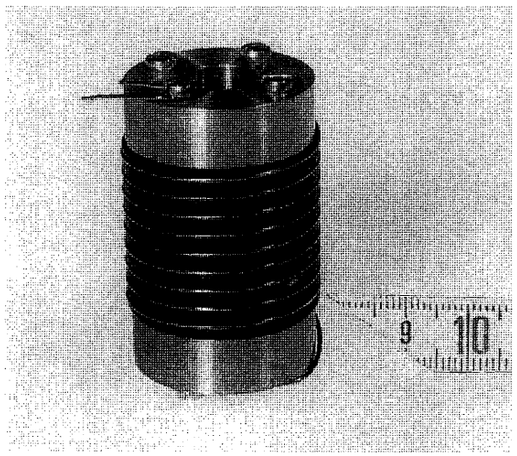
- Alstom s'est chargé :
  - d'optimiser les paramètres de fabrication des billettes et du câble
  - de fabriquer des billettes et des longueurs de câble tests
- Le CEA s'est chargé :
  - de caractériser les brins et les câbles fabriqués par Alstom
  - d'analyser l'influence des paramètres de fabrication sur les performances des brins et des câbles

Contributions du CEA à la Tâche Câble

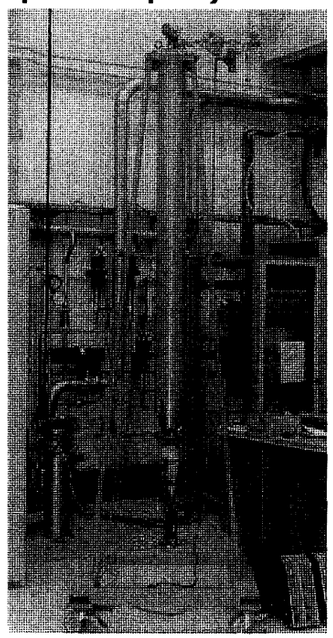
- Les mesures de caractérisation effectuées par le CEA incluent :
  - des mesures de courant critique sur brin (avant et après câblage)
  - des mesures de pertes sur brin
  - des mesures de résistances interbrin et de pertes sur câble
- Toutes ces mesures ont été analysées dans le détail et les résultats des analyses ont servi de base aux itérations successives menées par Alstom

Contributions du CEA à la Tâche Câble : Mesures de Courant Critique sur Brin

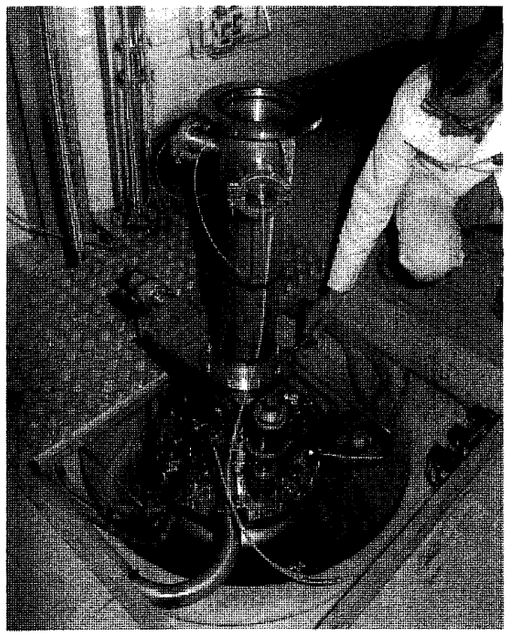
- Les mesures de courant critique sur brin ont nécessité la remise en œuvre de Gélotte (solénoide de 12 T ; bain échantillon à 4.2 K et 1.8 K à pression atmosphérique)



Echantillon VAMAS



Insert de Mesures



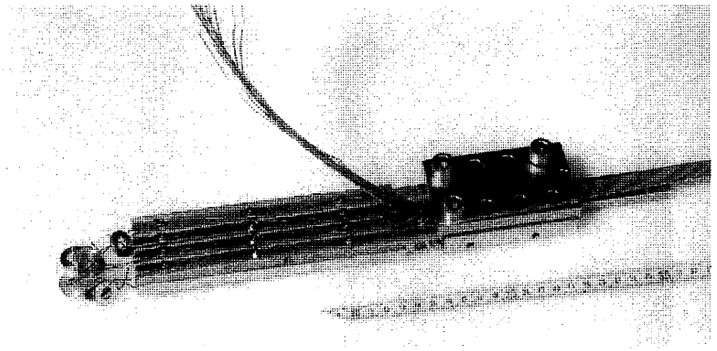
Cryostat d'Essais

Contributions du CEA à la Tâche Câble : Mesures de Pertes

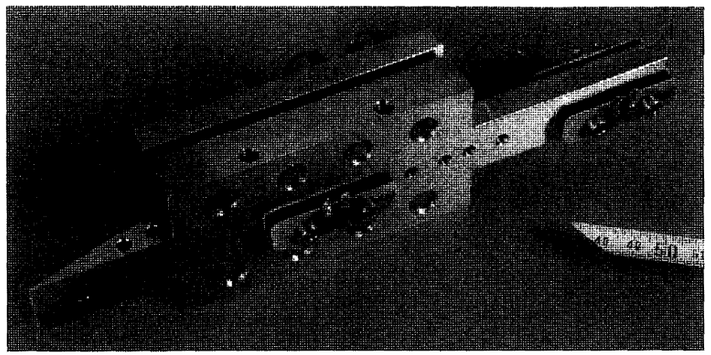
- Les mesures de pertes sur brin ont été effectuées dans Speedy au DRFC/STEP (par R. Otmani et T. Schild)

- Les mesures de résistances interbrin et de pertes ont nécessité la remise en œuvre de STEP (dipôle limité à 0.7 T par AdI ; 4.2 K)

Echantillon « Plumeau »



Mesures de Résistances Interbrin



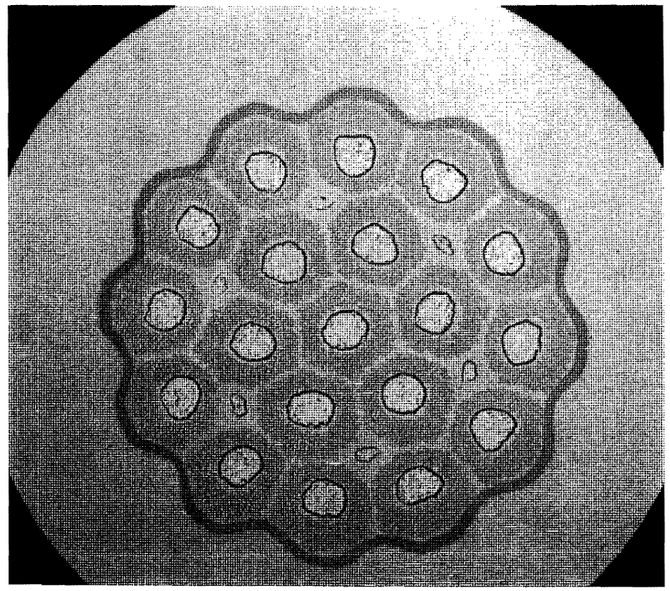
Mesures de Pertes

Bilan de la Tâche Câble

- Au total Alstom a produit :
  - au moins dix brins différents,
  - au moins six type de câbles,
- et le CEA a mesuré :
  - ~75 échantillons de courant critique sur brin
  - 10 échantillons de pertes sur brin (au DRFC/STEP)
  - 7 échantillons « plumeau »

Brin Retenu pour le Quadripôle Modèle

- Le brin le plus performant est constitué de 19 sous-éléments ronds entourés d 'une barrière unique en tantale, avec un rapport cuivre-sur-non cuivre de 1.4. Les sous-éléments sont constitués de 198 filaments.



(d 'après R. Otmani, 2000)

- Les performances mesurées sont :

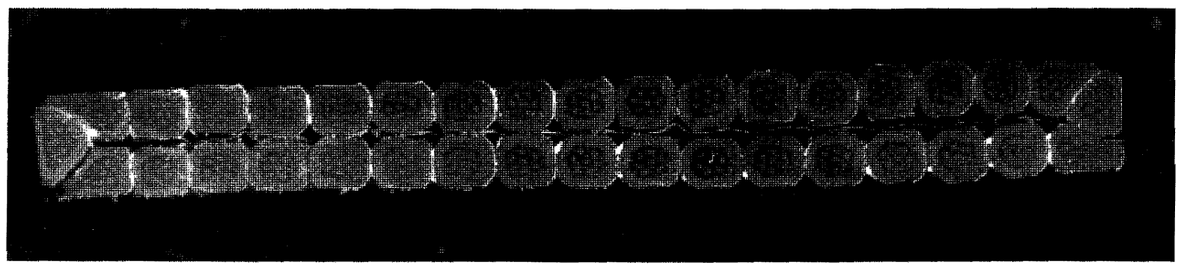
$I_C \approx 410$ A à 4.2 K et 7 T

Pertes ≈ 445 mJ/cm^3 ($\pm$3T)

RRR ≈ 195 à 0 T

Câble Retenu pour le Quadripôle Modèle

- Le câble retenu est constitué de brins sans revêtement, avec un rapport cuivre-sur-non-cuivre de l 'ordre de 1.4 sur 1, et une âme en acier inox 316L recuit de 25 μm d'épaisseur



- Les performances attendues sont :

Dégradation de câblage $\leq$ 10 %[a)]

Résistances de croisement $>$ 100 $\mu\Omega$

Résistances adjacente $\sim$ qq $\mu\Omega$

[a)]à confirmer par des mesures sur le câble final

Production du Câble pour le Quadripôle Modèle

- Le feu vert a été donné à Alstom pour la fabrication des billettes nécessaires à la production des ~10 km de brins pour le quadripôle modèle
- Le feu vert a été donné à Alstom pour le filage et l 'étirage du brin jusqu'à un diamètre de ~1 mm
- Les dimensions finales du brin et du câble devraient être figées d'ici la fin du mois et le feu vert sera donné à Alstom pour la production des 300 m de câble

Bilan Financier du Premier Accord de Collaboration

(Confidentiel)

Bilan de la Thèse de Rachid Otmani

- La thèse de Rachid Otmani a démarré le 26 octobre 1996 et s'est déroulée sans problème particulier
- Rachid a été embauché par Alstom le 4 janvier 1999, soit près de 10 mois avant la fin de son contrat CTCI (fait unique dans les annales du STCM)
- La thèse a été soutenue (avec mention très honorable) le 27 octobre 1999

Plan

- Rappels sur le Nb_3Sn
- Bref Historique du Programme Nb_3Sn Lancé en 1995
- Etat d'Avancement du Programme Nb_3Sn
- Bilan du Premier Accord de Collaboration avec Alstom et de la thèse de R. Otmani
- Etat de l'Art sur le Nb_3Sn en 2000
- Nouvelles Demandes du projet TESLA
- Nouveau Projet d'Accord de Collaboration avec Alstom et Nouveau Sujet de Thèse
- Perspectives

Progrès sur les Dipôles à Forts Champs en Nb_3Sn

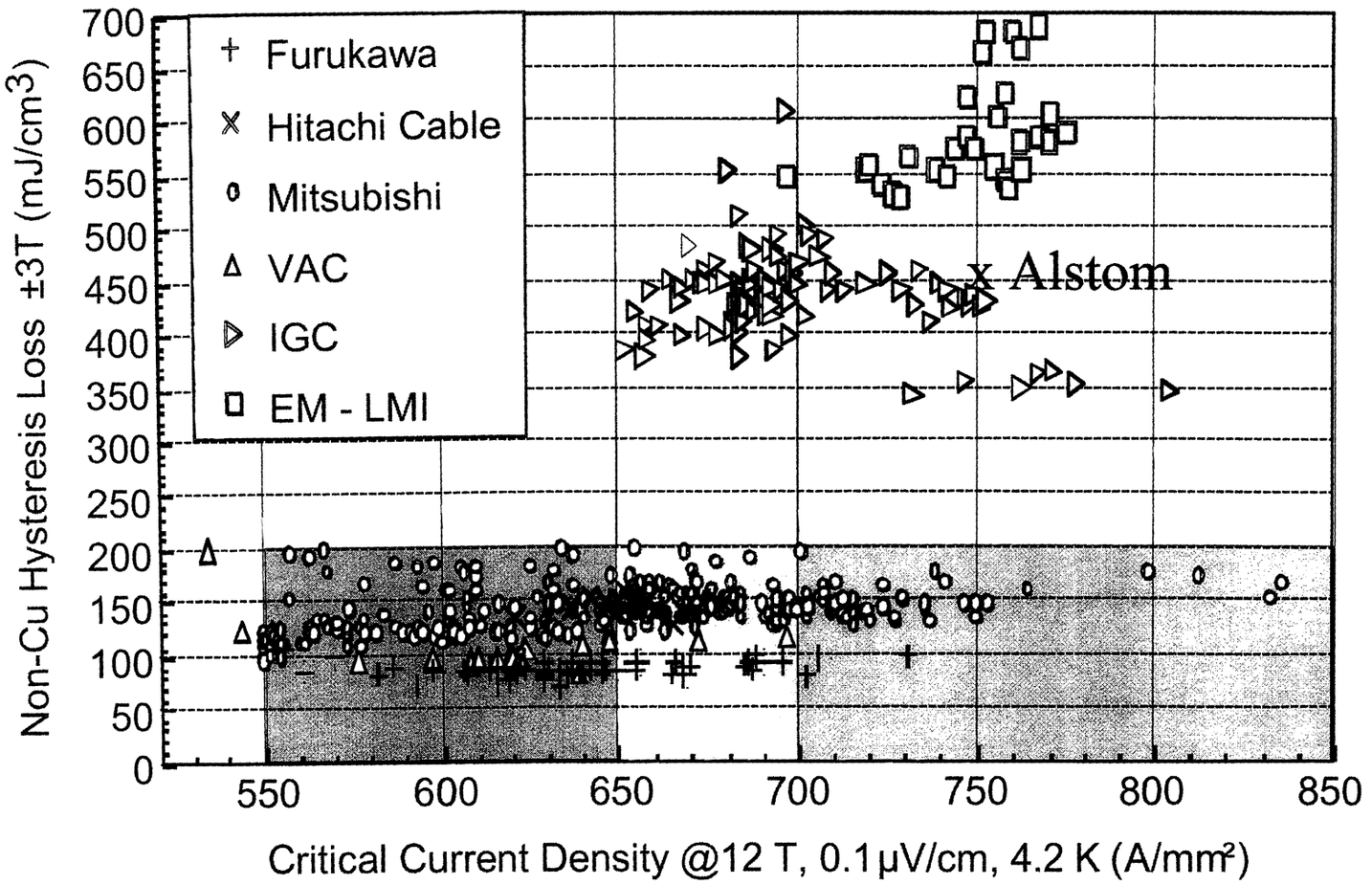
- Durant l'été 1995, l'Université de Twente a testé au CERN un dipôle modèle (MSUT), à une ouverture de 50 mm, qui a atteint une induction de 11.03 T lors de sa première transition à 4.4 K
- En mars 1997, le LBNL a testé un dipôle modèle (D20), également à une ouverture de 50 mm, qui a atteint une induction record de 13.5 T à 1.8 K (après ~40 transitions à 4.2 K et 1.8 K)
- A ce jour, D20 détient toujours le record d'induction dipôlaire

Bilan de la Production des Brins ITER

- La production des brins ITER s'est achevée en 1997

- Le brin développé en collaboration avec Alstom est en bonne position par rapport à cette production

Etat de l'Art en 2000 :
Bilan de la Production des Brins ITER
(préparé par P.J. Lee)

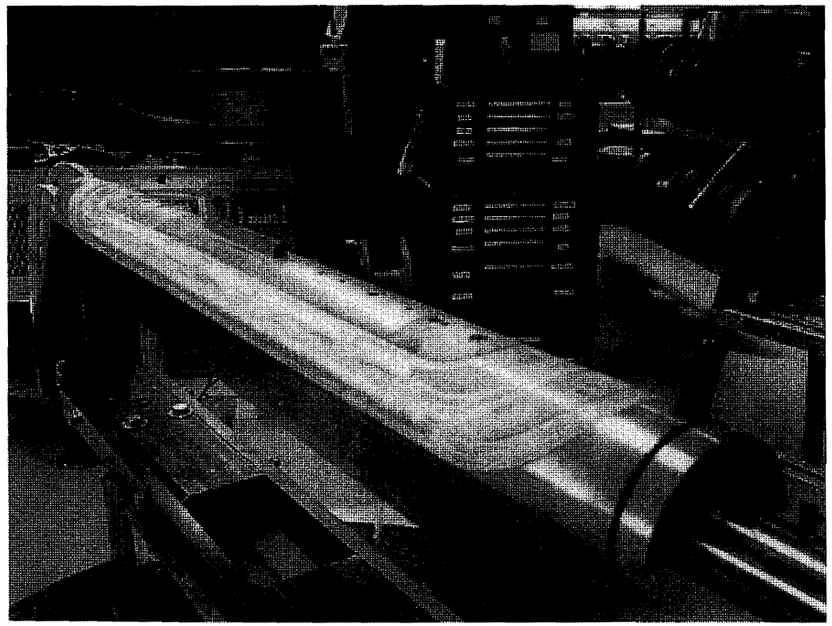


Nouveaux Programmes de R&D aux USA

- Le Fermilab et le LBNL ont pris le relais d'ITER pour promouvoir le développement de brins Nb_3Sn à « hautes performances » (VLHC)
- Dans ces nouveaux programmes, il a été décidé de privilégier J_C et de relâcher les spécifications sur les pertes
- Des résultats spectaculaires ont été récemment obtenus par OST ($J_C \approx 2250$ A/ mm^2 à 4.2 K et 12 T) et par IGC ($J_C \approx 2000$ A/ mm^2 à 4.2 K et 12 T)
- Le DOE a accepté de financer (500 000 $ en 2000 et 1 000 000 $ en 2001) un programme de R&D visant un J_C de 3000 A/mm^2 à 4.2 K et 12 T

Programme de R&D au Fermilab

- Le Fermilab a engagé depuis 1998 un programme ambitieux de R&D sur les aimants à forts champs (~2 000 000 $ en 2000, répartis 50/50 entre main d'œuvre et matériel)



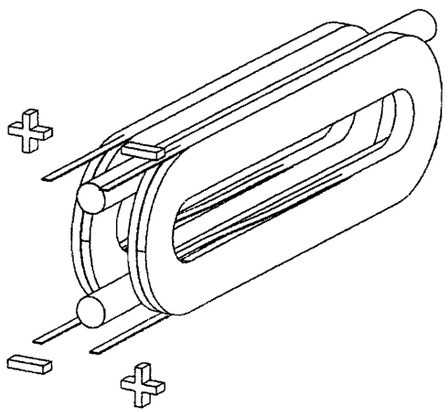
(d'après S. Zlobin, 2000)

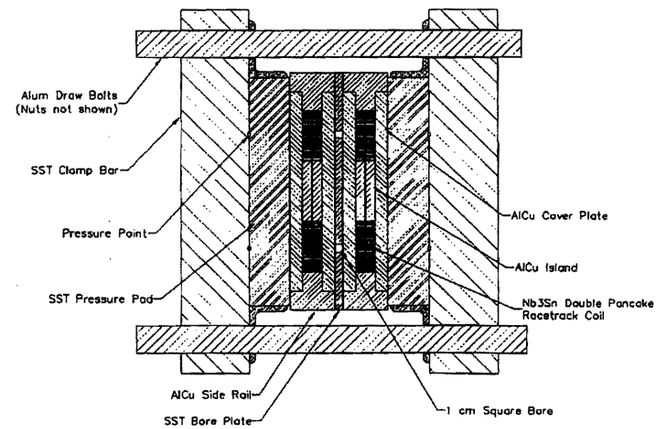
- Ce programme comprend la réalisation d 'au moins 4 dipôles modèles en Nb_3Sn (ouverture unique de 43.5 mm et champ de 11 T)

- Test du premier modèle en septembre 2000

Programme de R&D au LBNL

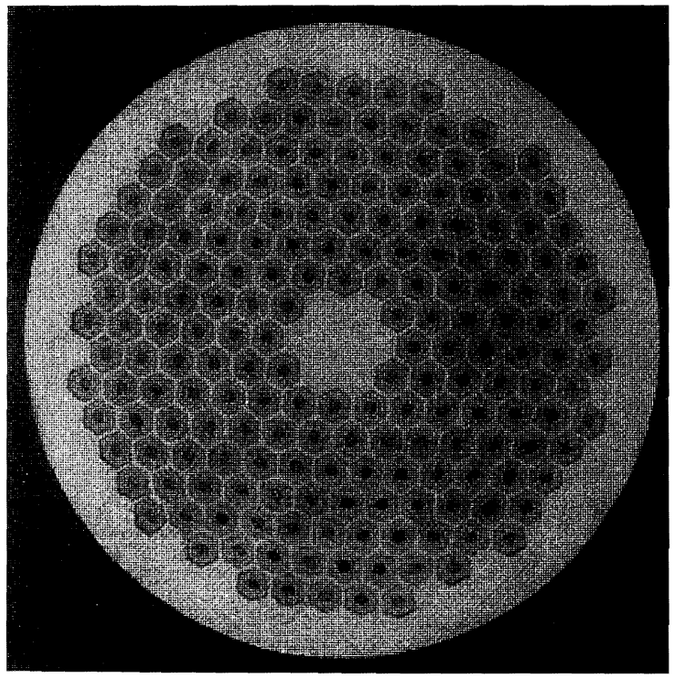
- Le LBNL a engagé, également depuis 1998, un programme de R&D sur une nouvelle configuration magnétique d'aimant dipolaire proposé par R. Gupta, qui s 'appuie sur des bobines de type « racetrack » placées en parallèle





- Un champ de 11.5 T a été obtenu le mois dernier avec deux bobines Nb_3Sn espacées de 1 cm ; un modèle à 4 bobines, pouvant délivrer ~14 T, est en cours de réalisation

Reprise de la Production du « Powder in Tube »



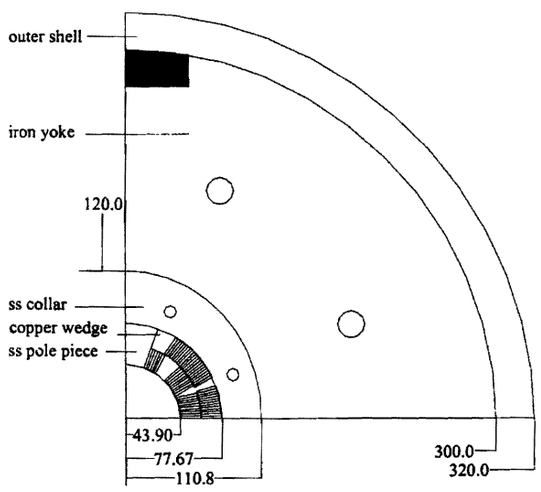
(d'après A. den Ouden, 2000)

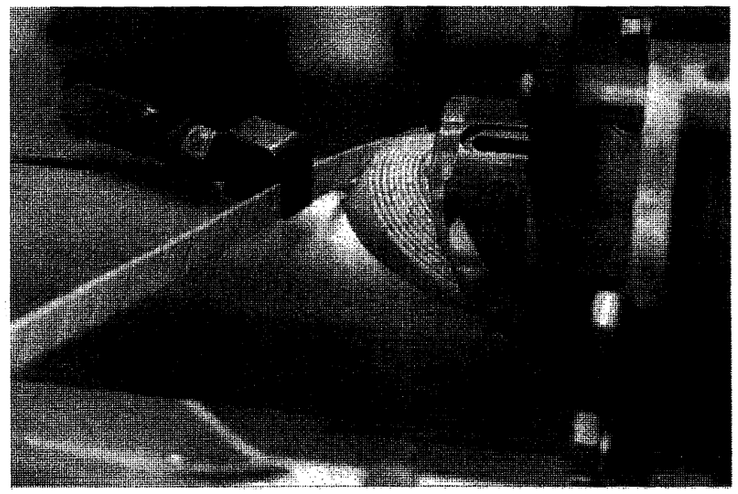
- La firme néerlandaise ShapeMetal Innovation (SMI) a redémarré la production de brins par la méthode du « Powder in Tube » (méthode et outillage ECN)

- un J_C record de 2300 A/mm^2 à 4.2 K et 12 T pour un diamètre effectif de l 'ordre de 50 μm a récemment été obtenu (billette de 50 kg)

Programme de R&D à l 'Université de Twente

- Les efforts de SMI sont soutenus par l'Université de Twente, qui a signé, en février 1998, un contrat de collaboration de 3 ans avec le CERN et NIKHEF en vue de la fabrication d'un dipôle modèle (ouverture unique de 88 mm, et champ de 10 T ; test en juin 2001)





(d'après A. den Ouden, 2000)

Plan

- Rappels sur le Nb_3Sn
- Bref Historique du Programme Nb_3Sn Lancé en 1995
- Etat d'Avancement du Programme Nb_3Sn
- Bilan du Premier Accord de Collaboration avec Alstom et de la thèse de R. Otmani
- Etat de l'Art sur le Nb_3Sn en 2000
- Nouvelles Demandes du projet TESLA
- Nouveau Projet d'Accord de Collaboration avec Alstom et Nouveau Sujet de Thèse
- Perspectives

Nouvelles Demandes du Projet TESLA

- Le Projet TESLA envisage d'utiliser un solénoide de type CMS (4 T sur l 'axe) pour son détecteur et a besoin de 4 quadripôles de focalisation finale (2 de 1.1 m et 2 de 1.7 m), qui, pour des raisons d 'optique du faisceau, seront placés à l 'intérieur du solénoide et seront donc soumis à l'induction de 4 T

- Ces quadripôles ont une ouverture unique de 56 mm et doivent produire un gradient de 250 T/m avec des spécifications très lâches sur la qualité de champ (en particulier en ce qui concerne les distorsions dues à l'aimantation du supraconducteur)

- Le STCM a été sollicité par le SEA (O. Napoly) pour effectuer une pré-étude des quadripôles de focalisation finale, en liaison avec l'étude du solénoide, également confiée au STCM

Pré-Dimensionnement des Quadripôles de Focalisation Finale pour TESLA

- Un pré-dimensionnement rapide montre que la conception électromagnétique actuelle du quadripôle Nb_3Sn pourrait convenir à condition de remplacer le câble par un câble plus performant

- Avec 20% de marge sur la droite de charge et en supposant 10% de dégradation de câblage, la spécification sur la valeur de J_C (pour un rapport cuivre-sur-non-cuivre de 1.4 sur 1) devient : ~1800 A/mm^2 à 4.2 K et 12 T

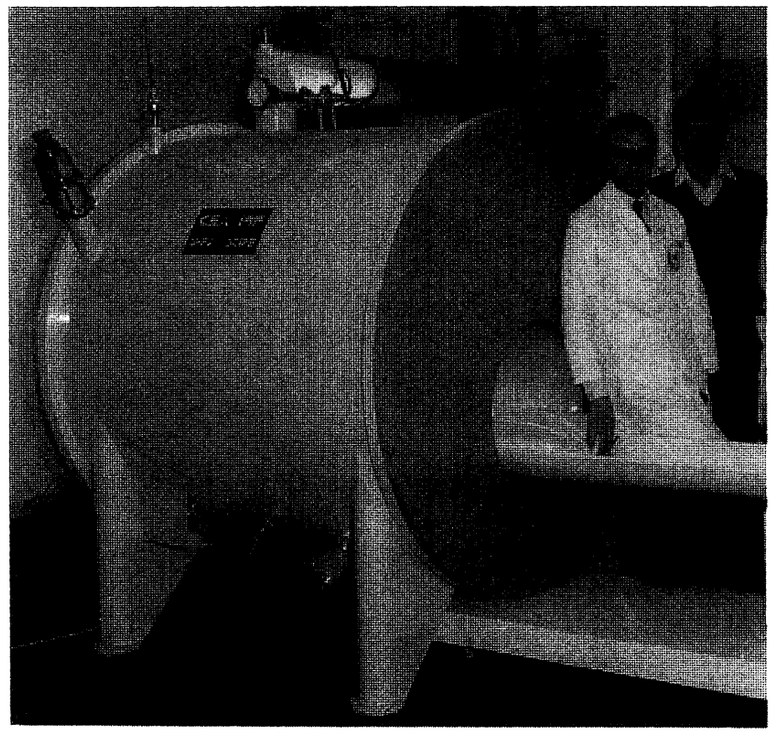
- Il n'apparaît pas nécessaire de mettre une spécification sur le diamètre effectif des filaments (si ce n'est que le brin doit être stable vis à vis des sauts de flux)

Influence du Solénoide sur les Performances des Quadripôles

- La configuration magnétique envisagée pour la focalisation finale de TESLA n'a jamais été testée et il est difficile de prévoir l'effet que le champ solénoidal pourra avoir sur les quadripôles (en particulier sur les têtes de bobine)

- Cette configuration magnétique peut être simulée en testant le quadripôle modèle en cours de réalisation dans l'ouverture de l'aimant RMN530 qui se trouve dans les réserves du STCM

Remise en Route de l'Aimant RMN530



- La remise en route de l'aimant RMN530 et son adaptation à la station d'essai horizontale du bâtiment 198 nécessite cependant un effort non négligeable (non prévu dans le programme initial)

Plan

- Rappels sur le Nb_3Sn
- Contexte du Programme Nb_3Sn Lancé en 1995
- Etat d'Avancement du Programme Nb_3Sn
- Bilan du Premier Accord de Collaboration avec Alstom et de la thèse de R. Otmani
- Etat de l'Art sur le Nb_3Sn en 2000
- Nouvelles Demandes du Projet TESLA
- Nouveau Projet d'Accord de Collaboration avec Alstom et Nouveau Sujet de Thèse
- Perspectives

Proposition de Nouvel Accord de Collaboration

- Etant donné le succès du premier Accord de Collaboration,
- Etant donnés les progrès réalisés ces dernières années dans le développement des brins Nb_3Sn aux USA et aux Pays Bas,
- Etant données les nouvelles demandes formulées par le projet TESLA,
- Il paraît judicieux et opportun de poursuivre le travail engagé avec Alstom en négociant un nouvel Accord de Collaboration, assorti d'une thèse, en vue du développement d'un brin et d'un câble permettant de réaliser un second quadripôle modèle pour TESLA.

Principal Objectif du Nouvel Accord de Collaboration

- Atteindre une densité de courant critique de
  2000 A/mm^2 à 4.2 K et 12 T
  dans un brin pouvant être mis en œuvre dans la réalisation d'un quadripôle modèle pour TESLA

Modalités du Nouvel Accord de Collaboration

(Confidentiel)

Répartition des Tâches pour le Nouvel Accord de Collaboration

- Il est proposé que la répartition des tâches pour le nouvel Accord de Collaboration soit la même que pour le premier Accord, à savoir :

  – Alstom se chargera d'optimiser les paramètres de fabrication des billettes et du câble, et de fabriquer des billettes et des longueurs de câble tests

  – le CEA se chargera de caractériser les brins et les câbles fabriqués par Alstom, et d'analyser l'influence des paramètres de fabrication sur les performances des brins et des câbles

Contributions du CEA au Nouvel Accord de Collaboration

- Le CEA continuera d'effectuer et d'analyser les mesures de courant critique et de pertes sur brin mises au point lors de la thèse de R. Otmani

- Il est proposé de prolonger et de compléter ces caractérisations et ces analyses en s'intéressant au problème de la stabilité des brins supraconducteurs

- A l'instar des études de comportement en champ variable, qui ont constitué le cœur de la thèse de R. Otmani, il est proposé que les études de stabilité constituent le cœur de la nouvelle thèse

De la Stabilité

- La stabilité est l'un des grands sujets d'étude sur les supraconducteurs (au même titre que le courant critique et les pertes)
- Comme pour la plupart des systèmes physiques, les causes d'instabilité pour un brin supraconducteur peuvent être rangées en deux catégories :
  - causes intrinsèques (*e.g.*, sauts de flux)
  - causes extrinsèques (*e.g.*, dépôts d'énergie dû a des frottements)

De la Stabilité (suite)

- Les études de stabilité connaissent un regain d'intérêt depuis quelques temps :

  – grâce aux travaux commandités par D. Leroy sur les brins et câbles LHC : P. Bauer, S. Kim, et M.N. Wilson (CERN), A. Gosh (BNL), E. Baynam (RAL), mais aussi K. Sasaki (KEK)
  (causes extrinsèques)

  – parce que les brins OST et IGC à fort J_C (méthode de l 'étain interne semblable à celle utilisée par Alstom) présentent des évidences de sauts de flux
  (causes intrinsèques)

Principaux Objectifs de la Nouvelle Thèse

- Soutenir le programme de R&D d'Alstom, en étudiant, en particulier, la stabilité vis à vis des sauts de flux (si sauts de flux il y a)
  (causes intrinsèques)
- Développer un dispositif expérimental, facilement adaptable aux dispositifs de mesures de courant critique sur brin, et permettant des mesures calibrées d'énergies de transition
  (cf. présentations de B. Baudouy et F. Trillaud)
  (causes extrinsèques)

Principaux Objectifs de la Nouvelle Thèse (suite)

- L'étude des sauts de flux et la validation du dispositif expérimental réclament un modèle numérique fin (cf. présentation de F.P. Juster au CSTS du 19/04/99)

- Concernant les mesures d'énergies de transition, il est envisagé de constituer une base de données pour différents types de brins placés dans différentes conditions de refroidissement (cf. présentation de B. Baudouy)

Intérêts du Nouveau Sujet de Thèse

- Sujet pluridisciplinaire (magnétisme, thermique, calculs) faisant appel à des compétences transversales dans le service (synergie d'efforts)
- Sujet riche, tant sur le plan théorique (calculs non-linéaires en transitoire) que sur le plan expérimental (montages et instrumentation fins)
- S'appuie sur un dispositif expérimental léger ne nécessitant pas de gros investissements (~50 kF par an pendant 3 ans)
- Tout le travail sera fait au STCM, permettant, comme pour la thèse de R. Otmani, un retour direct d'expérience

Encadrement de la Nouvelle Thèse

- Directeur de Thèse : P. Tixador (CNRS et INPG)
- Responsable Alstom : G.K. Hoang (à confirmer)
- Responsable CEA : A. Devred
- Experts CEA : B. Baudouy (dispositif expérimental), F.P. Juster (calculs numériques)
- Aide extérieure : DRFC/STEP

NB : A l'exception d'A. Devred, l'équipe CEA est constituée de personnes qui ne sont pas engagées sur le programme de quadripôle Nb_3Sn, ce qui ne devrait donc pas entraver son avancement

Plan

- Rappels sur le Nb_3Sn
- Bref Historique du Programme Nb_3Sn Lancé en 1995
- Etat d'Avancement du Programme Nb_3Sn
- Bilan du Premier Accord de Collaboration avec Alstom et de la thèse de R. Otmani
- Etat de l'Art sur le Nb_3Sn en 2000
- Nouvelles Demandes du projet TESLA
- Nouveau Projet d'Accord de Collaboration avec Alstom et Nouveau Sujet de Thèse
- Perspectives

Stabilité des Câbles

- L'objet ultime des études de stabilité extrinsèque est le brin au sein du câble bobiné dans un aimant

- Ce problème est extrêmement difficile à modéliser et nécessite des dispositifs expérimentaux très lourds (qui n'existent pas à l'heure actuelle au STCM)

- Les quelques travaux (S. Kim au CERN et K. Sasaki au KEK) qui ont été menés sur la stabilité des câbles n'ont, jusqu'à présent, pas été très concluants

Stabilité des Câbles (suite)

- Lorsque la station « fort courant » de C. Berriaud sera opérationnelle, on pourra envisager de s'attaquer, dans une deuxième étape, au problème de la stabilité des câbles
- On pourra commencer par considérer le cas d'un brin dans l'environnement d'un câble
- On pourra ensuite essayer de modéliser et de faire des mesures sur un petit câble (à 7 brins ?)
- Il est peu probable que ce travail puisse être engagé avant la fin de la thèse proposée

III. Présentation de l'étude expérimental

B. Baudouy

Motivation scientifique pour le projet d'étude de la stabilité de brins supraconducteurs

---

Présentation de l'étude expérimentale

B. Baudouy et F.-P. Juster

Plan

- Introduction
- Contexte de l'étude
- Modèle physique
- Paramètres d'étude
- Calculs de dimensionnement
- Etat des lieux sur les méthodes résistives
- Bibliographie des systèmes existants
- Calibration
- Planning
- Perspectives

Introduction

- Etude expérimentale et numérique de la stabilité de brins pour des *perturbations extrinsèques*, mais aussi étude possible des *perturbations intrinsèques* pour le Nb_3Sn (Etude numérique)

- Elle a souvent été traitée dans le cadre d'un projet précis qui en a réduit d'autant le nombre de paramètres d'étude.

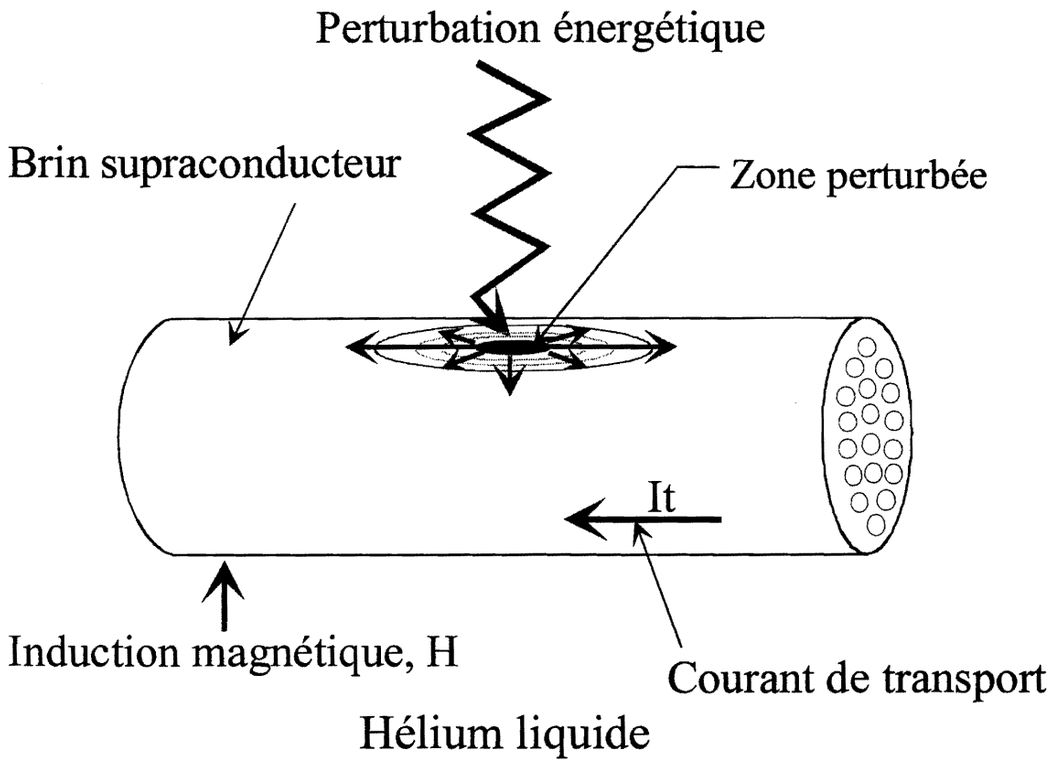
- Les majorités des études se sont portées sur des perturbations énergétiques spatiales de l'ordre du cm^2 et temporelle de l'ordre de la ms.

- Une seule étude récente s'est portée sur des perturbations énergétiques de petites dimensions spatiales et temporelles.

Contexte de l'étude des perturbations extrinsèques

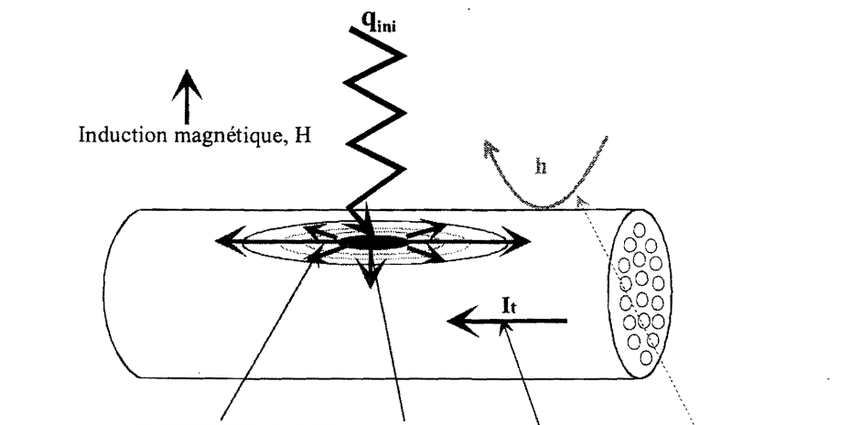
- Choix de se concentrer uniquement sur l'étude de la stabilité des brins supraconducteurs.
- Etude de la plus petite énergie de transition (MQE)
- Mouvement des brins dans le câble dû aux forces de Lorentz, rétreints thermiques, ...
- Perturbations
  - spatiales de l'ordre du mm^2
  - temporelles d'environ 100 µs
  - énergétiques de l'ordre du 100 µJ

Modèle physique



Quelle énergie faut-il déposer dans le brin pour qu'il transite ?

Modèle physique



C, Capacité calorifique

k(T, H), Conductivité du supraconducteur

q_{ini}, puissance volumique à l'instant initial

I_t, courant de transport
$r(H, I_t, T)$, résistance linéique
A, section du brin

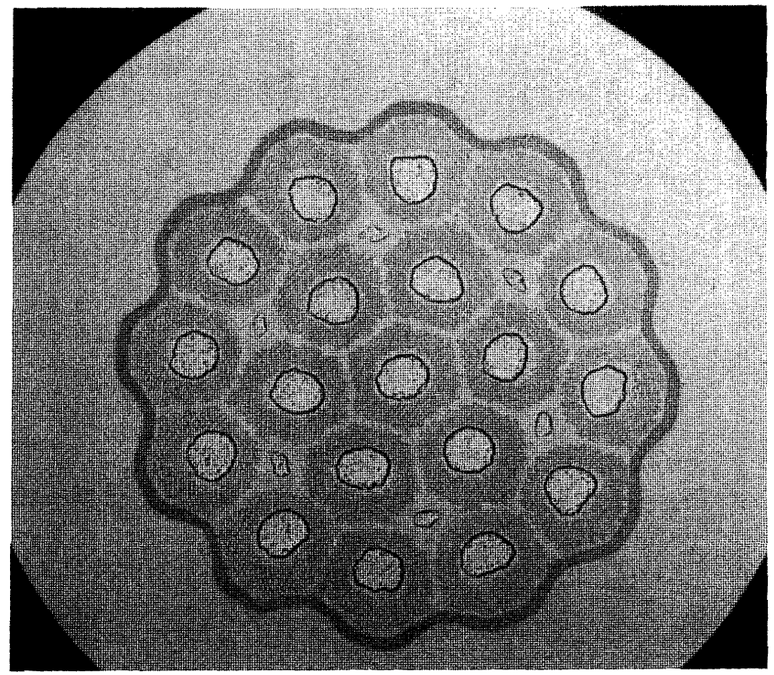
p, périmètre mouillé
h, coefficient d'échange
T, T_b, Température du brin et du bain

Paramètres d'étude: Conditions d'opération

- Courant de transport
- Induction magnétique
- Modes de refroidissement:
  - He II et He I à 1 atm (dispositif expérimental)
  - adiabatique : Calibration et Cas du Nb_3Sn parce que bobinage imprégné
  - Nature de l'interface (isolé, Volume d'hélium autour du brin)

Paramètres d'étude: Caractéristiques du brin

- Nature du supraconducteur:
  - NbTi, Nb_3Sn, Nb_3Al, HTS
- Nature du stabilisant
  - Cu, CuNi, Al, CuSn
- Proportion et géométrie du brin
  - Stabilisant/non-stabilisant
  - Ø et arrangement des filaments
  - Barrières

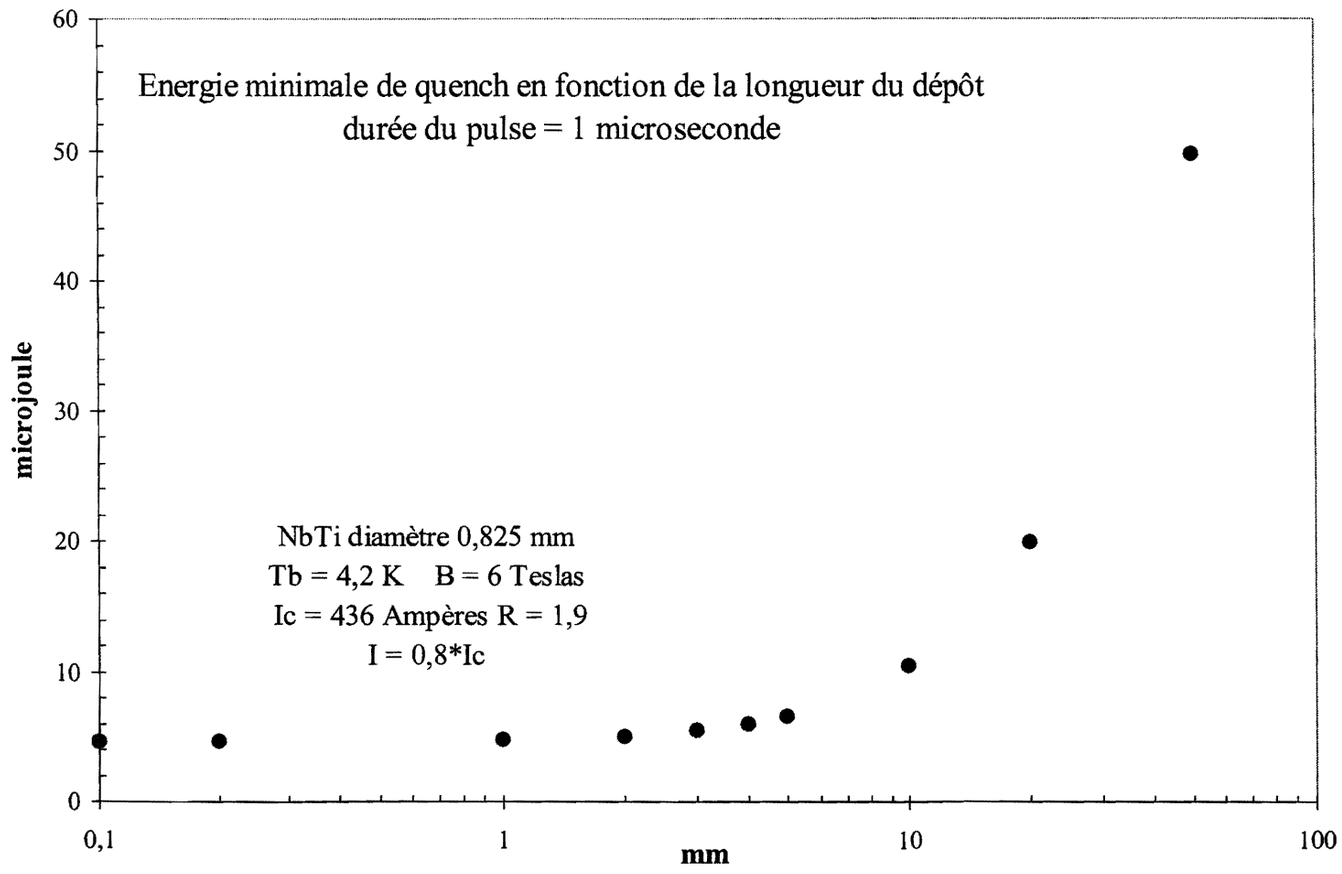


- Fourniture par Alstom pour le projet du câble Nb_3Sn

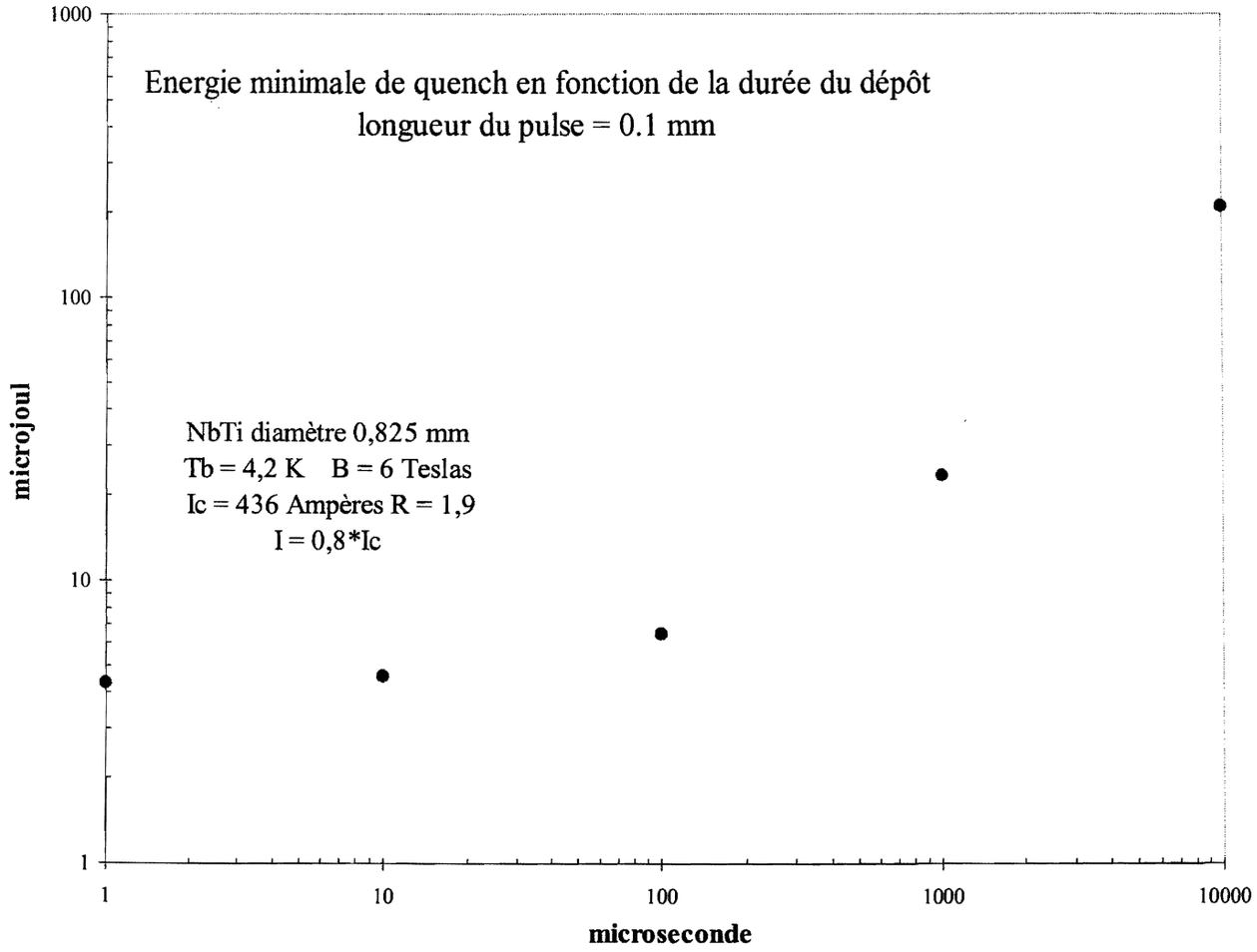
Paramètre de la perturbation

- On cherche l'énergie minimum de transition ou MQE
  - Zone de chauffage doit être locale.
  - Zone perturbée doit être inférieure à la zone minimum de propagation de la transition du brin.
  - Temps de perturbation inférieur au temps de création de la zone minimum de propagation.

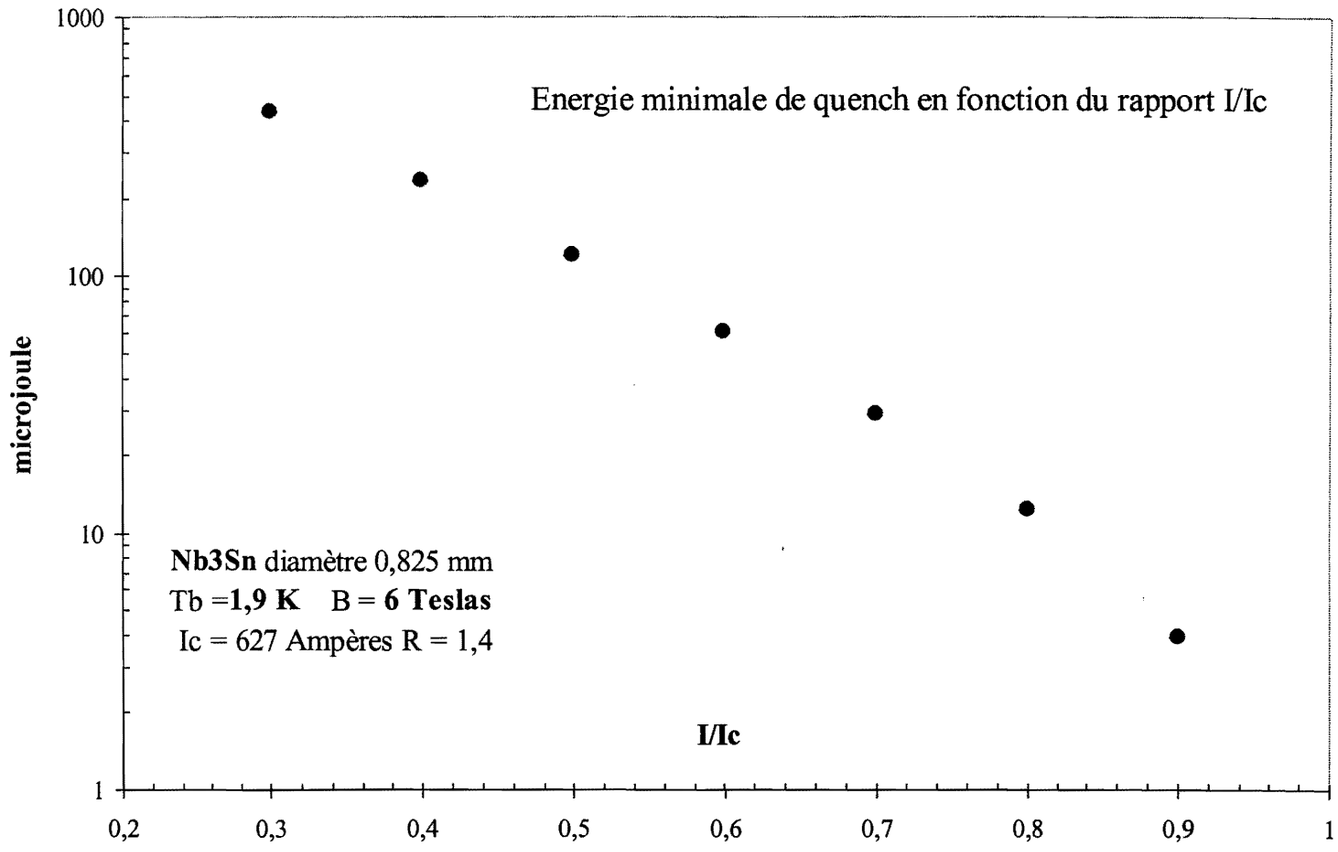
Calculs de dimensionnement (F.-P. Juster)



Calculs de dimensionnement (F.-P. Juster)



Calculs de dimensionnement (F.-P. Juster)



Calculs de dimensionnement (F.-P. Juster)

- MQE attendues : de 1 μJ à 1 mJ
- Longueur de chaufferette ≈ 1 mm
- I/Ic = 0.8 et B = 6 teslas
- Durée de pulse ≈ 10 μs
- ⇒ MQE à 5 %
- Durée de pulse ≈ 100μs
- ⇒ MQE à 50 % en NbTi
- ⇒ MQE à 25 % en Nb_3Sn

Systèmes possibles

- Il existe plusieurs façons de transmettre les pulses de chaleur au brin supraconducteur :
  - Les systèmes résistifs : Chaufferettes externes et Sur-courant (de transport)
  - Les systèmes inductifs : Calibrations
  - Le chauffage par laser : Utilisé pour des films supraconducteurs de quelques nm d'épaisseur.
  - Perturbations mécaniques par martelage (A. Daël)

Etat des lieux sur les méthodes résistives

- Etude expérimentale (et numérique) en 1990 de P. Maccioni (CEA, Cadarache) par méthode du sur-courant.

- Etude en 1996 par Seo par chaufferette externe

  - Chauffeur résistif en résine epoxy chargé en carbone pressé sur le brin

- Etude expérimentale 1996-98 sur les brins des câbles LHC par le CERN et le Brookhaven National Laboratory (BNL).

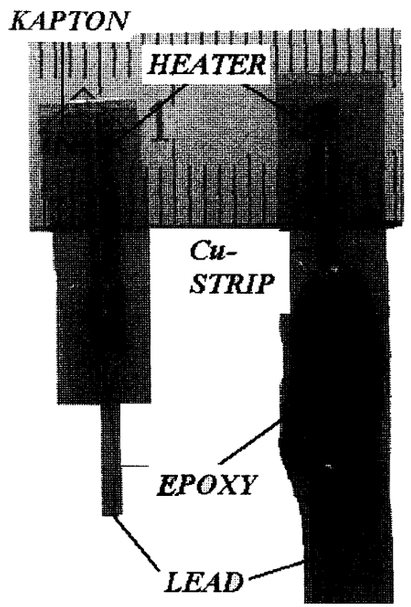
  - BNL : Chauffeur résistif.
  - CERN : Chauffeur résistif de petite dimension (Thèse de P. Bauer).

Dispositifs résistifs utilisés

- Le Kapton Sandwich Heater de A.K. Gosh (BNL)
- Le Clamp Heater : amélioration du Sandwich Heater (BNL et Seo)
- Le Tip Heater issu de la thèse de P. Bauer (CERN).

Kapton Sandwich Heater

- Utilisation sur brins et câbles.
- Deux couches de Kapton adhésif, une lamelle de cuivre, un dépôt de résine résistive.



Reproductibilité des mesures d'environ 50 %.

Sensibilité aux chocs thermiques et mécaniques

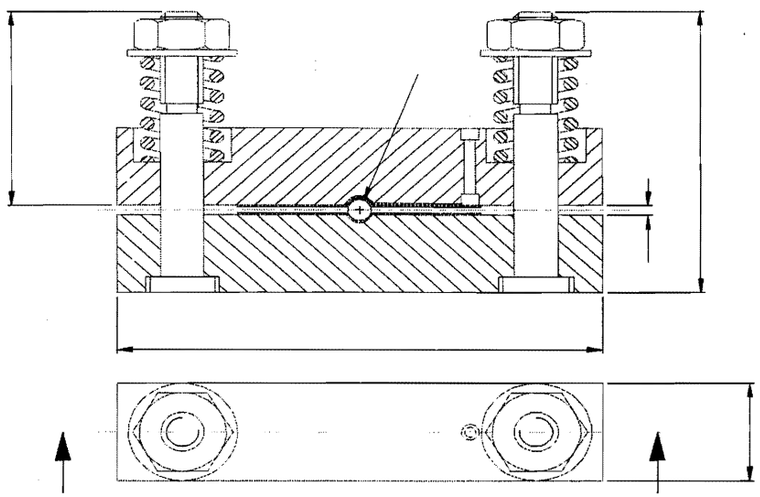
50 % des chauffeurs se détachent lors de la mise en froid

Pas de contrôle de la résistance de contact.

Mauvaise isolation thermique à l'environnement

Clamp Heater

- Même principe mais chauffeur pressé
  - Meilleur contrôle de la résistance de contact.
  - Meilleur positionnement relatif de tous les éléments.

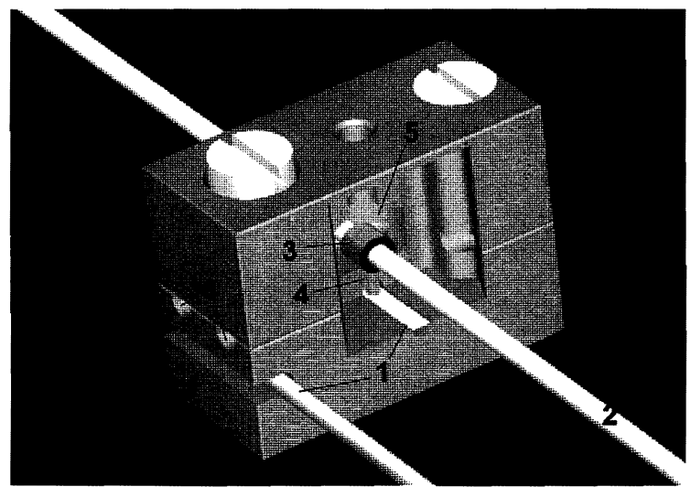


Tip Heater

- Pointe chauffante de Ø 0.6 mm avec dépôt résistif de 10 µm d'épaisseur.
- Résistance de contact maîtrisée par une vis couplée à un ressort
- 90 % de la circonférence du brin baigne dans l'hélium grâce à des canaux d'amenée d 'hélium.

Reproductibilité des mesures d'environ 10 %.

Mauvaise isolation thermique à l'environnement



Questions en suspens

- Incertitude sur la détermination de l'énergie déposée dans le brin supraconducteur.

  Calibration du chauffeur nécessaire.

- Mesure d'énergies de transition avec une zone chauffée supérieure à la zone minimum de propagation.

  MQE or not MQE?

- Etude principalement sur les brins des câbles du LHC.

  Augmentation du nombre de paramètres d'étude nécessaire.

Calibration

- Calibration nécessaire : Quel est le rapport entre l'énergie qui passe dans le bain et dans le brin
- Méthode Adiabatique
  - Comparaison entre mesure en adiabatique et mesure en He Liquide
- Méthode inductive
  - Comparaison entre mesure chauffeur et mesure inductive
- Méthode de l'interrupteur
  - Transition d'un interrupteur supraconducteur

Planning général

- Etude bibliographique début 1999
- Stage de M. Dalban (6 mois, Août 1999-Janvier 2000)
  Développement d'un chauffeur résistif
- Stage de DEA de F. Trillaud (6 mois, Mars 2000-Août 2000)
  Mesure avec le chauffeur et calibration
- Thèse cofinancée avec Alstom (3 ans, 2000-2004)
  Mesures et analyses
- Service Militaire en coopération international sur les transferts de chaleur transitoires (2001) au Laboratoire de cryogénie au NHMFL du Pr. Van Sciver

Planning de la thèse

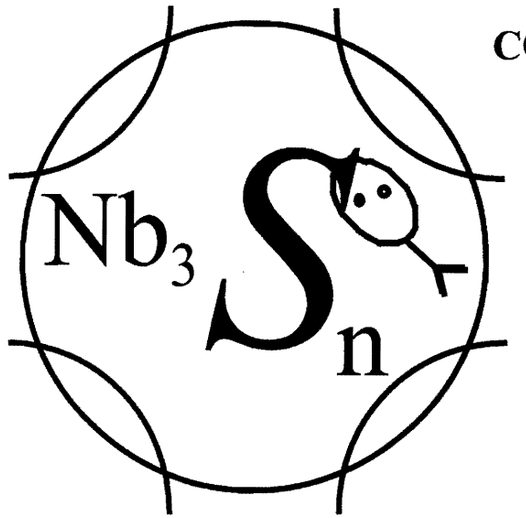
- Support au développement du câble Nb_3Sn
- Mise au point et itération
  - Chauffeur
  - Méthode de calibration
- Mesures et analyses
  - Etude de différents brins (Ic, pertes et stabilité) en He liquide et adiabatique
  - Elaboration d'un modèle numérique
  - Comparaison entre mesures et modèle

Perspectives expérimentales

- Perspectives parallèles : Mesures de transfert de chaleur
  - Expérience sur les transferts de chaleur transitoires entre le cuivre et l'hélium liquide (pulse de 100 µs et 100 µJ)
- Perspectives futurs : Mesures sur câble
  - Etape future
  - Expérience en cours au Japon

IV. Mise en œuvre du dispositif expérimental et premiers essais

F. Trillaud



COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIERE

Département d'Astrophysique, de Physique des Particules,
de Physique Nucléaire et de l'Instrumentation Associée

**Service Technique de Cryogénie
et de Magnétisme**

Mise en œuvre du dispositif expérimental et premiers essais

F. Trillaud

(stagiaire DEA de Génie Electrique de Paris)

Plan

- Introduction
- Rappel du principe de la mesure
- Présentation du dispositif expérimental
- Travail en cours

Introduction

- Point de départ : thèse de R. Otmani soutenue en octobre 1999, consacrée principalement aux mesures de courant critique et de pertes sur brins supraconducteurs.

- Stage de fin d'étude ESTP (été 1999) : mesures de courant critique sur brins supraconducteurs fabriqués par Alstom.

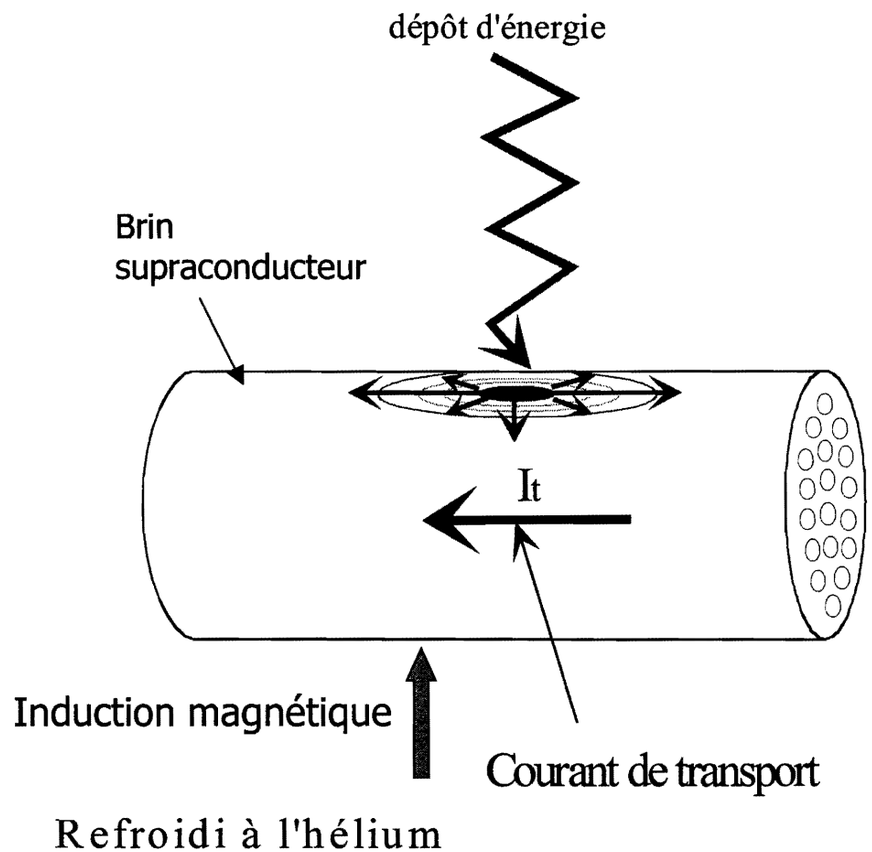
- Compléter ces premières caractérisations par une étude de stabilité.

- Stage de DEA (en cours) : mise au point du dispositif expérimental pour l'étude de stabilité et intégration de ce dispositif dans la station GELOTTE.

Energie minimum de transition (c.f. B. Baudouy)

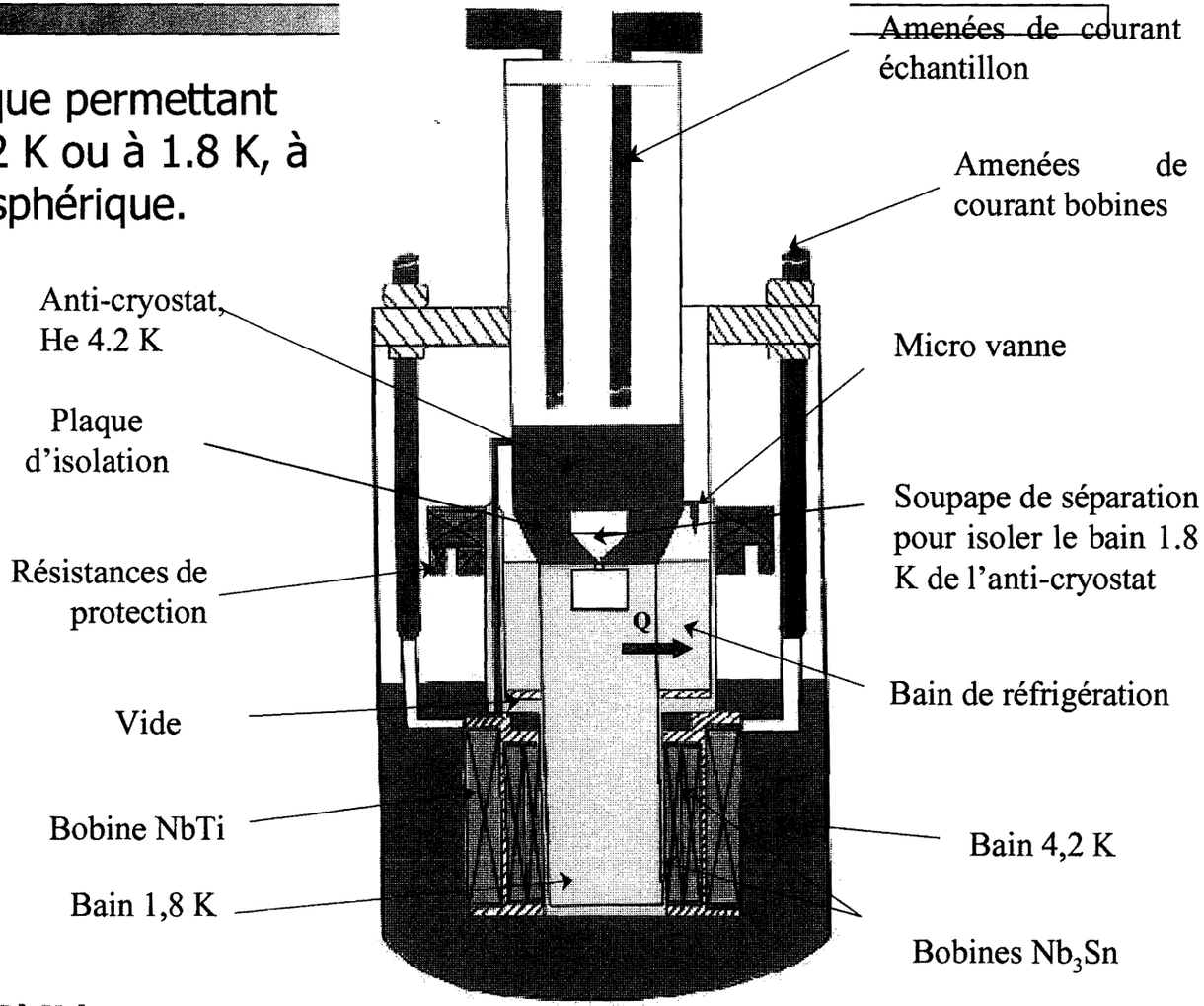
- On chauffe localement un brin supraconducteur dans le but de déterminer l'énergie minimum de transition.

- Sachant que ce brin est :
  - Parcouru par un courant de transport
  - Plongé dans un champ magnétique
  - Refroidi par un bain d'hélium



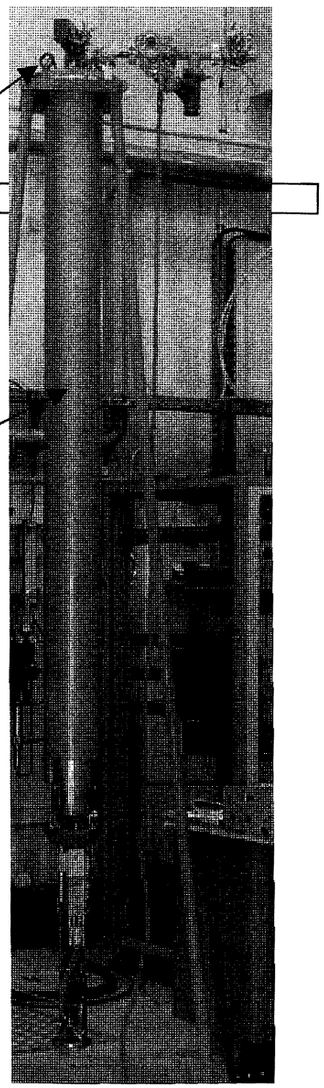
Station d'essai GELOTTE

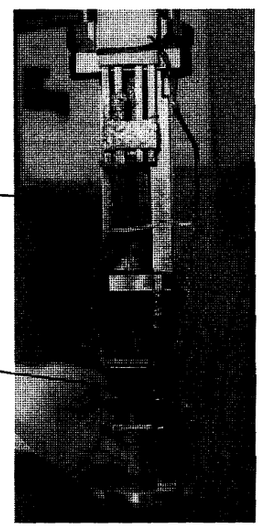
- Station cryogénique permettant de travailler à 4.2 K ou à 1.8 K, à la pression atmosphérique.



Insert de mesure

- Forme cylindrique d'environ 2 m. de hauteur pour un diamètre de 15 cm. , Constitué :
  - D'une sortie tuyauterie He gaz, sondes, amenées de courant, ...
  - D'un cylindre en G-10 (fibre de verre imprégnée de résine), servant d'isolant thermique.
  - D'un porte échantillon.
  - Echantillon (hauteur de 50 mm, pour un diamètre de 30 mm).

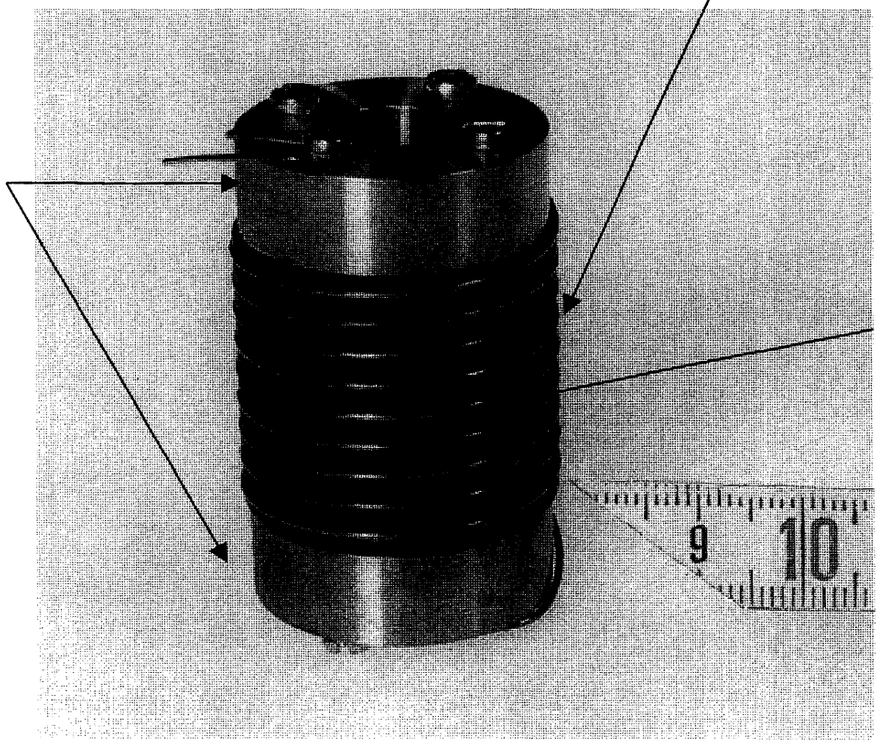




Mandrin de norme VAMAS

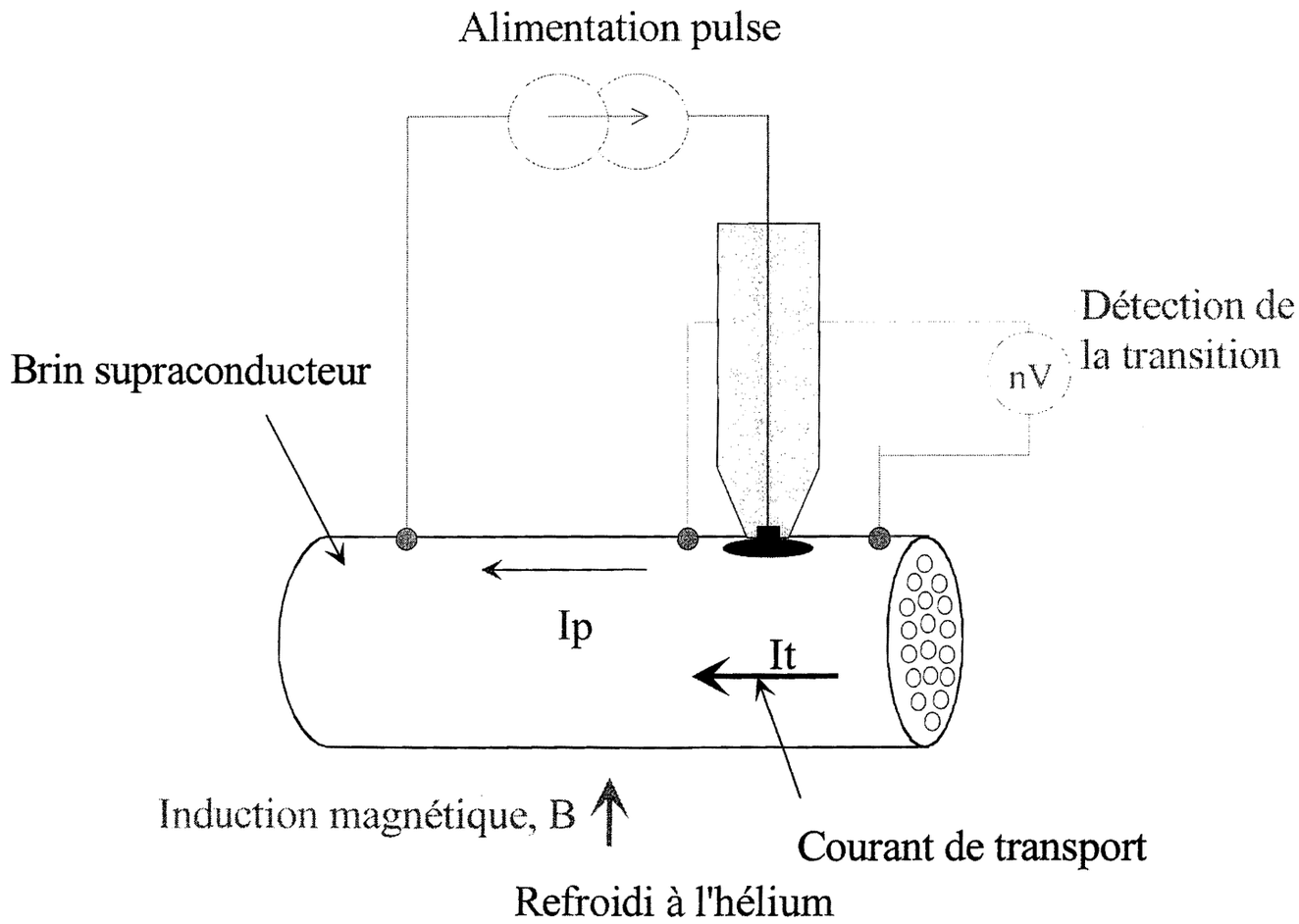
Partie centrale filetée en titane (29 mm. de hauteur pour un diamètre de 30 mm.).

Deux bagues extérieures, dorées (10 mm. de hauteur)



Brin supraconducteur

Principe expérimental

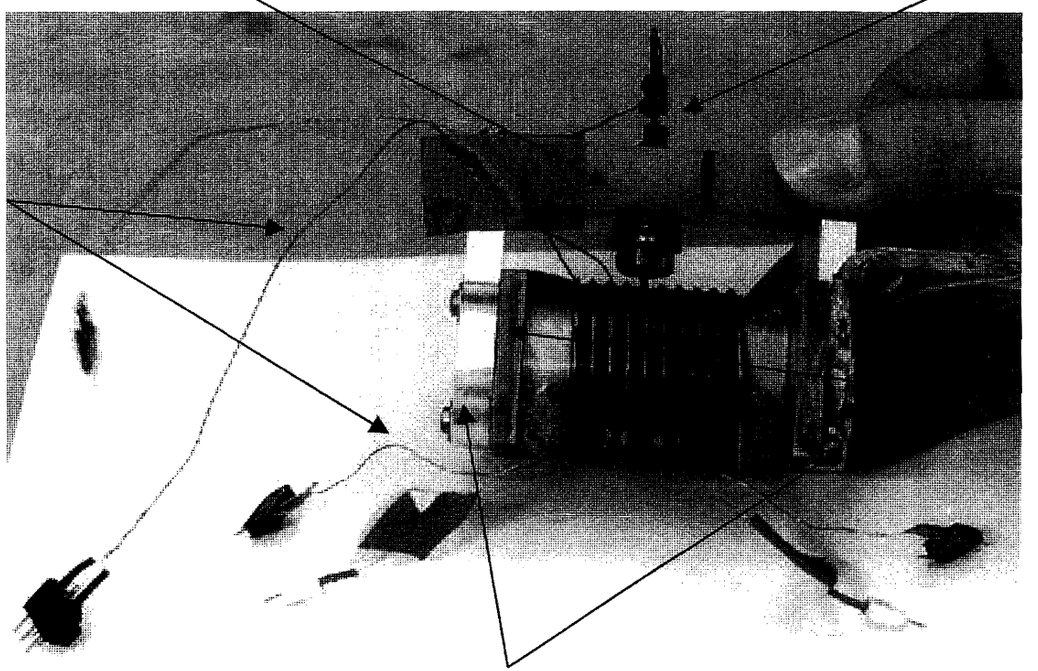


Dispositif porte chauffeur

Porte vis en G-10

Vis porte chauffeur

Fils de cuivre soudés sur le brin

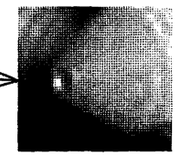


Amenées de courant brin supraconducteur

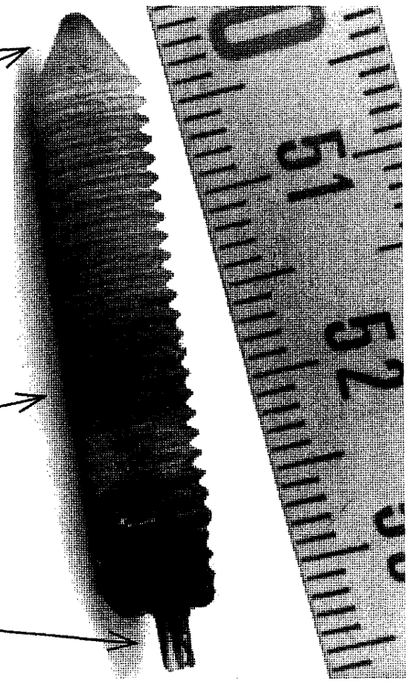
Deux bagues en aluminium supportant le porte vis

Description du chauffeur résistif

- Embout de vis
  - Diamètre Ø 1 mm
  - Profondeur de 0.5 mm
  - Surface de contact d'au plus 0.8 mm^2
  - Volume d'au plus 0.4 mm^3.



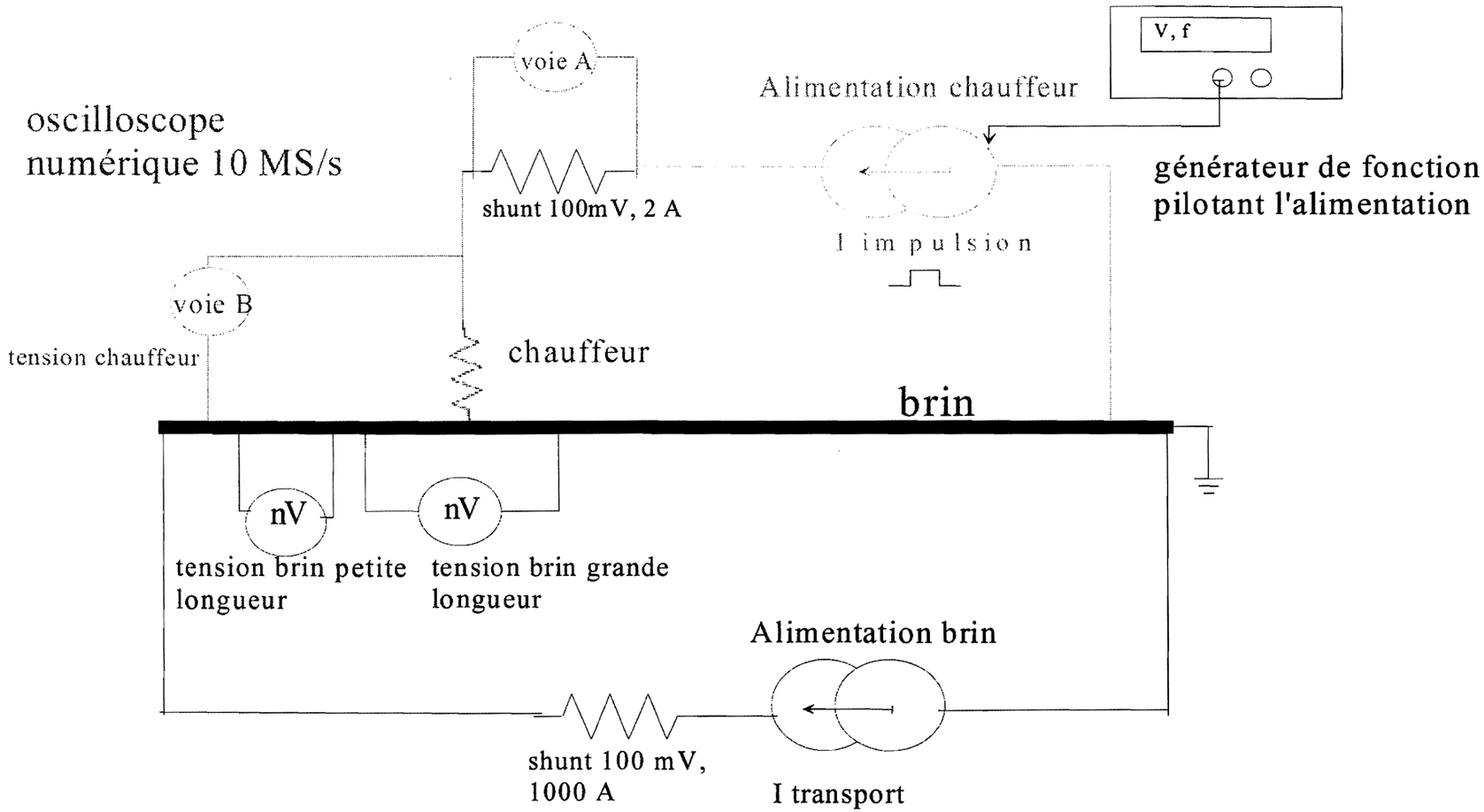
- Chauffeur (résine résistive Eccobond 60L) polymérisé en bout de vis. Le contact électrique avec l'amenée de courant est amélioré par de la laque d'argent.



- Vis en verre époxy de 30 mm. de long.

- Amenée de courant : connecteur et fil de cuivre noyés dans de la résine isolante.

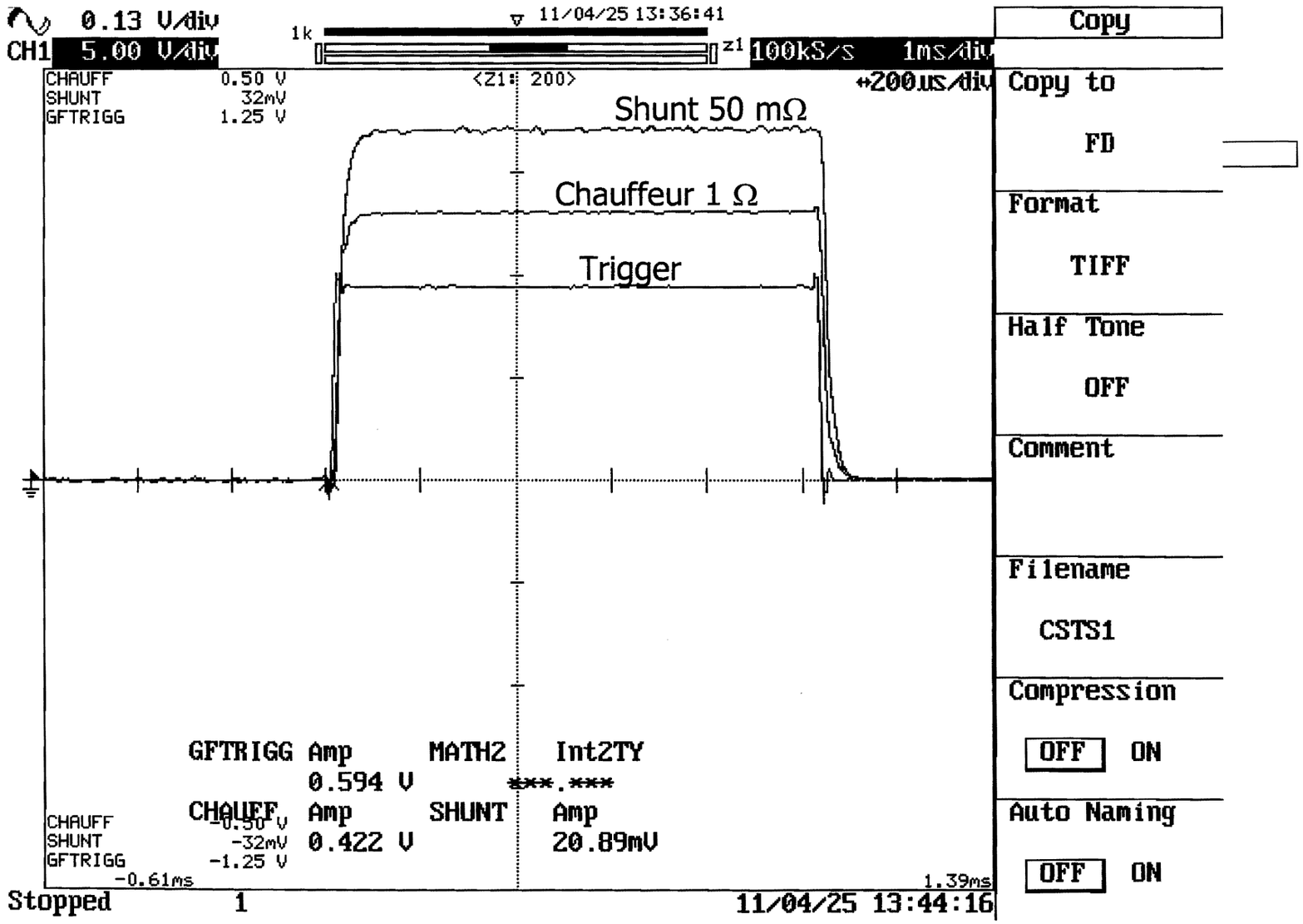
Schéma électrique du dispositif expérimental



Réalisation de chauffeurs et premiers tests

- Réalisation de plusieurs chauffeurs (3).

- Test de l'alimentation impulsionnelle et de l'acquisition sur des résistances calibrées représentatives du chauffeur (50 mΩ, 100 mΩ, 500 mΩ, 1 Ω).


0.13 V/div
CH1 5.00 V/div
11/04/25 13:36:41
1k
z1
100kS/s
1ms/div
CHAUFF 0.50 V
SHUNT 32mV
GFTRIGG 1.25 V
<Z1: 200>
↔200µs/div
Shunt 50 mΩ
Chauffeur 1 Ω
Trigger
GFTRIGG Amp
0.594 V
MATH2 Int2TY
.
CHAUFF Amp
SHUNT Amp
0.422 V
20.89mV
CHAUFF -0.50 V
SHUNT -32mV
GFTRIGG -1.25 V
-0.61ms
1.39ms
Stopped
1
11/04/25 13:44:16
Copy
Copy to
FD
Format
TIFF
Half Tone
OFF
Comment
Filename
CSTS1
Compression
OFF ON
Auto Naming
OFF ON

V. Conclusion

P. Tixador

CSTS - CEN Saclay - 26 AVRIL 2000

CONCLUSIONS

Projet d'étude sur la stabilité de brins supra.

Thèse cofinancée par Alstom

P. TIXADOR

CNRS - CRTBT/LEG

Grenoble

DEUX FAITS IMPORTANTS

- Augmentation des J_C des brins Nb_3Sn

  ➡ 2000 - 2300 A/mm² @ 4,2 K - 12 T

  Perspectives : 3000 A/mm² @ 4,2 K - 12 T

- Nombreux projets avec Nb_3Sn

  ➡ Aimants fort champ : Fermilab / LBNL / Tesla / Twente

REGAIN D'INTERET TRES NET AIMANTS Nb_3Sn

ACQUIS PAR LA THESE DE R. OTMANI

- **Bancs d'essai**

  ➡ **I_c, R_a , R_c, pertes a.c.**

- **Base de données importante (10 brins testés)**

  ➡ **Base de référence pour toute la communauté**

- **Résultat prometteur sur stabilité du câble Nb_3Sn / NbTi**

  ➡ **Fort R_c - faible R_a : faibles pertes & bonne stabilité *(?)***

STABILITE : POINT FONDAMENTAL A ETUDIER

1er PROJET STCM - ALSTOM / THESE R. OTMANI

- Recherches prospectives sur quadripôle NbSn
  - ➡ Application visée : aimants des rég. d'interaction
- Projet pluri-acteurs réussi
  - ➡ Doctorant, chef de projet, implication des acteurs
- Thèse ("technologique") de qualité
  - ➡ Document de référence qui restera

- Réalisation du quadripôle

2ème PROJET STCM - ALSTOM / THESE

- Recherches directement appliquées

  Demande de TESLA

- Conditions extrêmement favorables
  - Contexte, regain d'intérêt net sur aimants NbSn
  - Alstom partant
  - Compétences et "avance" du STCM
  - Environnement expérimental, bancs d'essais
  - Candidat
  - Thèse pluridisciplinaire riche

THESE STABILITE

- Thèse pluridisciplinaire riche
  - Expérimentation fine et délicate
  - Modélisation multi-physique à développer
  - Résultats préliminaires encourageants

Problème difficile *IMPORTANT* & peu abordé d'un point de vue général