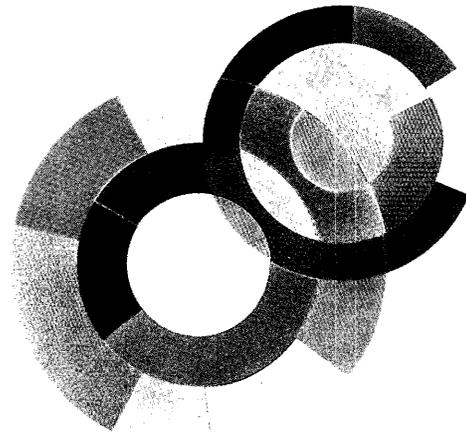
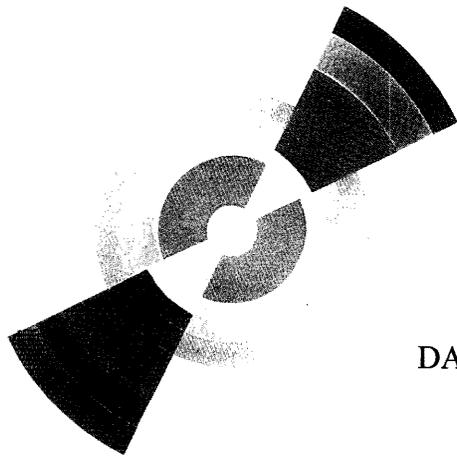


DAPNIA-STCM-00-05



CEA/SACLAY
JUL 10 2000
LIBRARY



DAPNIA/STCM-00-05

Mai 2000

MINI-REVUE DU PROJET DE QUADRIPOLE Nb_3Sn
(CSTS du 19 avril 2000)

A. Devred, M. Durante, C. Gourdin, F. Streiff

DAPNIA

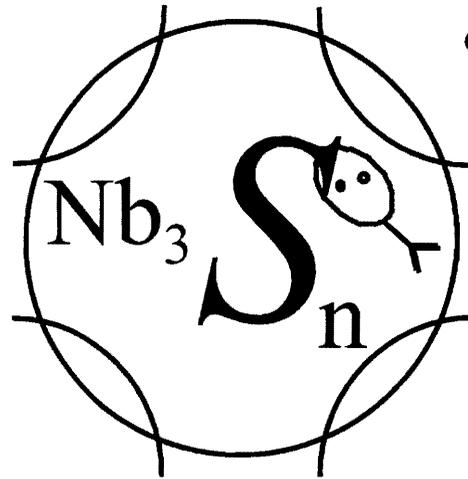
Département d'Astrophysique, de Physique des Particules, de Physique Nucléaire et de l'Instrumentation Associée
CEA/Saclay F-91191 Gif-sur-Yvette Cédex

Sommaire

- I. Etat d'avancement du projet :** A. Devred
- II. Etat d'avancement de la Tâche Câble :** A. Devred
- III. Etat d'avancement de la Tâche Isolation :**
A. Devred
- IV. La mécanique et le gamme de montage
du quadripôle Nb₃Sn :** C. Gourdin
- V. Etat d'avancement de la Tâche Etude de Jonction :**
F. Streiff
-

I. Etat d'avancement du projet

A. Devred



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

Etat d'Avancement du Projet de Quadripôle Nb₃Sn

Présenté par Arnaud Devred
CSTS « restreint » du 19 avril 2000

Remerciements

A. Anton (consultant)
L. Bacquart (sc)
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. Riflet
S. Sanchez (sc)
T. Schild
F. Streiff (sc)
P. Tixador (CNRS et INPG)
F. Trillaud (stagiaire ESTP)
P. Védrine

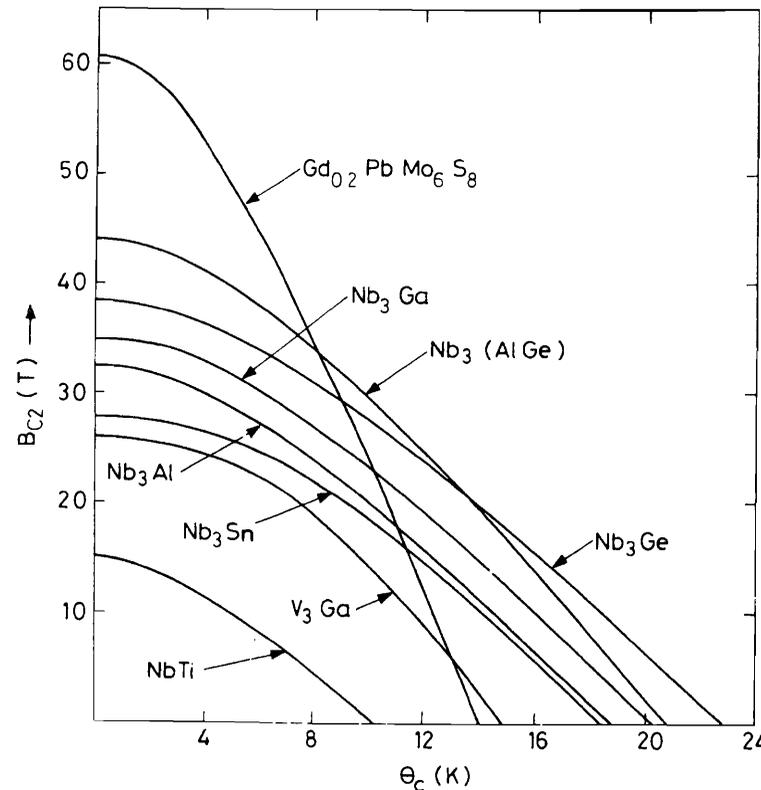
Sommaire

- **Bref Historique**
- **Bilan humain et financier**
- **Tâches Accomplies**
- **Tâches à Accomplir**
- **Nouveau Planning**

Objectifs Initiaux du Projet (1995)

- Augmenter la R&D du STCM en magnétisme
- Préparer l'avenir en se familiarisant avec la technologie du Nb₃Sn (forts champs)
- Maintenir un lien fort avec Alstom en l'aidant à se hisser au niveau de ses compétiteurs dans le développement de brins Nb₃Sn
- Profiter de la dynamique du programme de quadripôles LHC en NbTi pour, dans la foulée et à moindre coût, fabriquer un quadripôle modèle en Nb₃Sn

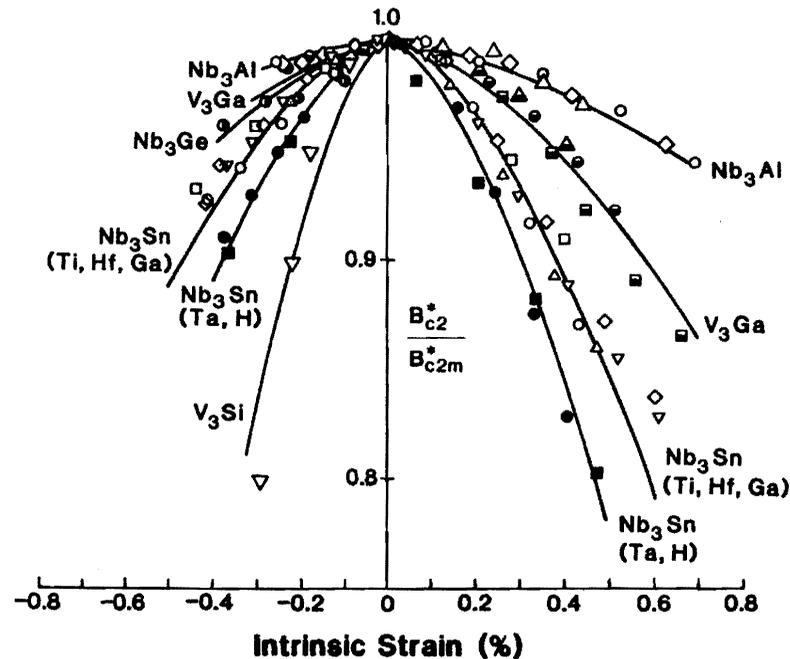
Pourquoi le Nb₃Sn ?



D'après M.N. Wilson, 1983

- 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
- 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 Nb₃Sn

Difficultés de Mise en Œuvre du Nb₃Sn



D'après J.W. Ekin, 1984

- Le Nb₃Sn 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

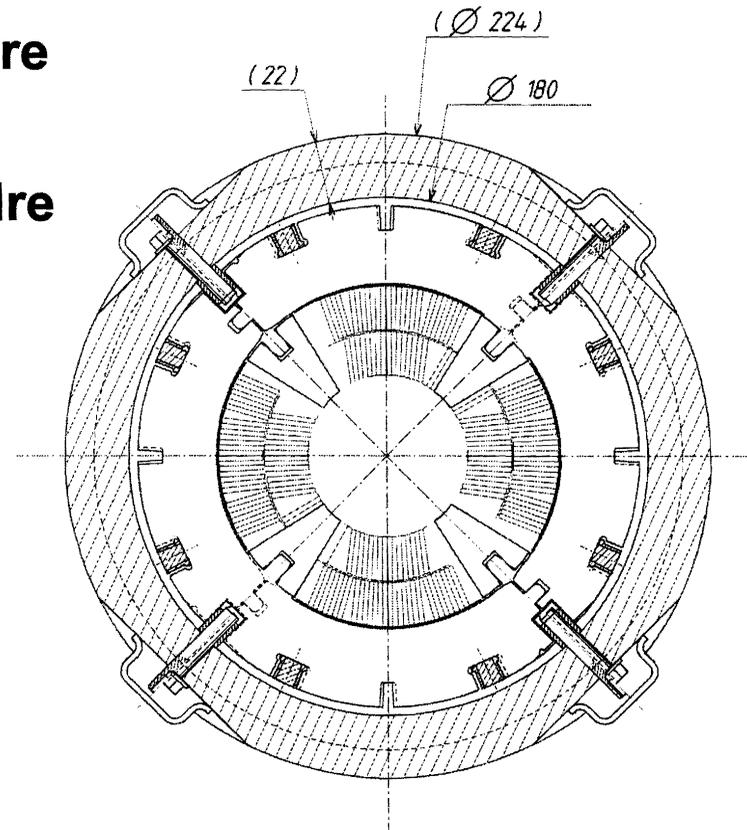
Design de Base du Quadripôle en Nb₃Sn

(A partir de la conception 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 en Nb₃Sn

Le quadripôle modèle sera fabriqué selon la technique du
« wind, react, & impregnate »

Les principales étapes en sont :

- Guipage du câble non-réagi à l'aide d'un ruban de fibres minérales désensimé
- Bobinage du câble guipé
- Traitement thermique du bobinage en atmosphère inerte pour former le composé Nb₃Sn
- Imprégnation de résine sous vide du bobinage réagi

Dates Clés pour la Période 1995-1999

- CSTS élargi le 25 octobre 1995
- Comité de Réalisation le 12 décembre 1995
- Lettre-projet issue le 15 février 1996
- Démarrage de la thèse de R. Otmani le 26 octobre 1996
- Embauche de M. Durante (CIES) le 5 janvier 1998 ← Délai
- Départ de R. Otmani pour Alstom le 4 janvier 1999
- Ré-empauche de M. Durante (CTE) le 10 mai 1999
- Rattachement de C. Gourdin en septembre 1999
- Embauche de S. Marchant (Postdoc) le 18 octobre 1999
- Soutenance de la thèse de R. Otmani le 27 octobre 1999

Organisation du Projet Nb₃Sn

- **Dés le début, l'activité Nb₃Sn a été pensée et organisée en projet**
- **Rédaction d'un PAQ, définissant le découpage technique et le système de numérotation des documents (base de données informatisée accessible aux membres de l'équipe projet par le réseau NICE)**
- **Etablissement d'un planning avec une estimation détaillée des ressources humaines**
- **Etablissement d'un budget basé sur l'expérience des quadripôles en NbTi**

Bilan des Documents Enregistrés

(Préparé par C. Gourdin)

• Courriers Arrivés

	1995	1996	1997	1998	1999	Total
	2	175	236	123	88	624

• Notes, Compte Rendus, Dessins

	1995	1996	1997	1998	1999	Total
Total	18	50	79	60	63	270
Devred	83%	56%	38%	27%	22%	38%
Durante				28%	24%	12%

• Correspondance

	1995	1996	1997	1998	1999	Total
Total	27	70	40	17	11	121
Devred	93%	81%	78%	12%	55%	68%

Gestion des Ressources Humaines

- Les moyens humains ont toujours été considérés comme le point le plus critique du programme
- Lors de l'établissement du planning, une liste détaillée des tâches a été dressée, avec une estimation de leur durée et des moyens humains (nominatifs) nécessaires à leur réalisation
- Pour la conception et la réalisation du quadripôle modèle il était prévu de s'appuyer sur l'expérience de l'équipe des quadripôles LHC (J.M. Rifflet, M. Peyrot, P. Védrine au STCM et M. Masson et J. Thinel au SGPI)
- Le plan de charge du projet de quadripôle Nb₃Sn a été établi de manière à être cohérent avec le plan de charges du projet de quadripôles LHC

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
Rifflet	0.2/0.1	0.2/0.1	0.2/0.1	0.1/0.0	0.7/0.3	-0.4
<i>Thésard</i>	<i>0.3/0.3</i>	<i>1.0/1.0</i>	<i>1.0/0.9</i>	<i>0.7/0.0</i>	<i>3.0/2.3</i>	<i>-0.7</i>
Védrine	0.3/0.2	0.3/0.1	0.3/0.1	0.1/0.0	1.0/0.4	-0.6
Autres A1 (STCM)	0.5/0.5	0.4/0.6	0.3/0.6	0.2/0.4	1.4/2.1	+0.6
SGPI	0.7/0.1	0.7/0.1	0.4/0.1	0.0/0.0	1.8/0.3	-1.5
Total <i>(hors thésard)</i>	3.8/1.7	3.6/2.0	3.3/2.8	0.8/1.3	11.5/7.9	-3.7



Constat sur le Bilan Humain

- **CTE embauché(e) avec 2 ans de retard (dû à l'extrême lenteur de l'administration à recruter un candidat américain très motivé)**
- **Déficit de 1.6 H.an de la part de l'équipe quadripôle LHC (dû à un étalement et une consommation de main d'œuvre plus grande que prévue par le projet de quadripôles LHC)**
- **Déficit de 1.5 H.an de la part du SGPI (même raison que précédemment)**

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)**

Stratégie d 'Adaptation

(selon la formule d 'A. Dael)

- **Face au déficit de ressources humaines, il a été décidé d 'attendre que celles-ci se libèrent, plutôt que de faire un travail d 'amateur**
- **Entre temps, les études de R&D sur le conducteur et l 'isolation ont été prolongées au delà de ce qui était initialement prévu, favorisant l 'émergence de nouvelles idées (e.g., isolation « innovante »)**
- **L 'activité Nb₃Sn connaît un nouvel élan depuis l 'automne 1999 avec l 'arrivée de C. Gourdin (qui travaille directement sur le quadripôle modèle) et S. Marchant (qui travaille en parallèle sur l 'isolation « innovante »)**

Tâches Accomplies au 19/04/2000 :

Calculs de Conception

- **Conception électromagnétique : identique à celle des quadripôles LHC en NbTI (à l'exception du circuit magnétique)**
- **Protection en cas de transition : étude détaillée réalisée par F.P. Juster en juillet 1996**
- **Calculs thermiques : trois études effectuées par F.P. Juster d'octobre 1996 à juin 1998**
- **Calculs mécaniques : C. Gourdin vient de remettre à plat le modèle CASTEM permettant de décrire le comportement de la masse froide lors du freinage, la mise en froid et l'excitation**

Tâches Accomplies au 19/04/2000 :

Composants du Quadripôle

- **L 'Accord de Collaboration avec Alstom et la thèse de R. Otmani ont permis de développer un brin qui satisfait au cahier des charges et de mettre au point la fabrication du câble. La fabrication des 300 m de câble pour le quadripôle modèle pourra être lancée sous peu.**
- **L 'extension du programme d 'études sur l 'isolation « classique » a permis de développer un ruban de fibres de silice de faible épaisseur, qui, malgré sa fragilité, est une solution viable pour le guipage du conducteur**
- **Un premier jeu de cales de tête en céramique vient d 'être réalisé par le CTTC de Limoges**

Tâches Accomplies au 19/04/2000 :

Fabrication du Quadripôle

- **Un projet détaillé de gamme de fabrication a été développé à l'automne 1999. Ce projet fixe les grandes options concernant la conception et l'assemblage de la masse froide (cf. présentation de C. Gourdin).**
- **Un programme d'études sur la réalisation des jonctions est en cours (cf. présentation de F. Streiff)**
- **J. Thinel a commencé à réfléchir à la mise en place du tube d'inertie**

Tâches Accomplies au 19/04/2000 :

Tests du Quadripôle

- **Une discussion a été engagée sur la conduite des essais à froid du quadripôle modèle. Il est envisagé de le tester en deux phases :**

(1) par lui-même,

(2) dans l'ouverture de l'aimant RMN530, pour simuler la configuration magnétiques des quadripôles de focalisation finale de TESLA.

Tâches à Accomplir avant Réalisation : Calculs de Conception

- **Validation du modèle mécanique CASTEM par un essai de frettage et exploitation des résultats pour dimensionner les composants du quadripôle et les outillages (cf. présentation de C. Gourdin)**

Tâches à Accomplir avant Réalisation : Composants du Quadripôle

- **Production du câble et mesures de courant critique (sur câble) à l'Université de Twente (ces mesures ne sont pas sur le chemin critique)**
- **Mise au point de la procédure de guipage du câble et choix des agents démoulants pour l'imprégnation sous vide**
- **Choix du matériau et de la méthode de fabrication des cales de tête**
- **Choix du matériau et de la méthode de fabrication de l'isolation intercouche**
- **Définition de l'isolation à la masse**

Tâches à Accomplir avant Réalisation : Montage du Quadripôle

- **Conception détaillée de la masse froide et des outillages**
- **Rédaction des procédures de montage et des fiches de contrôle**
- **Réalisation des tests de jonction**
- **Définition de l'instrumentation**

Tâches à Accomplir :

Essais à froid du Quadripôle

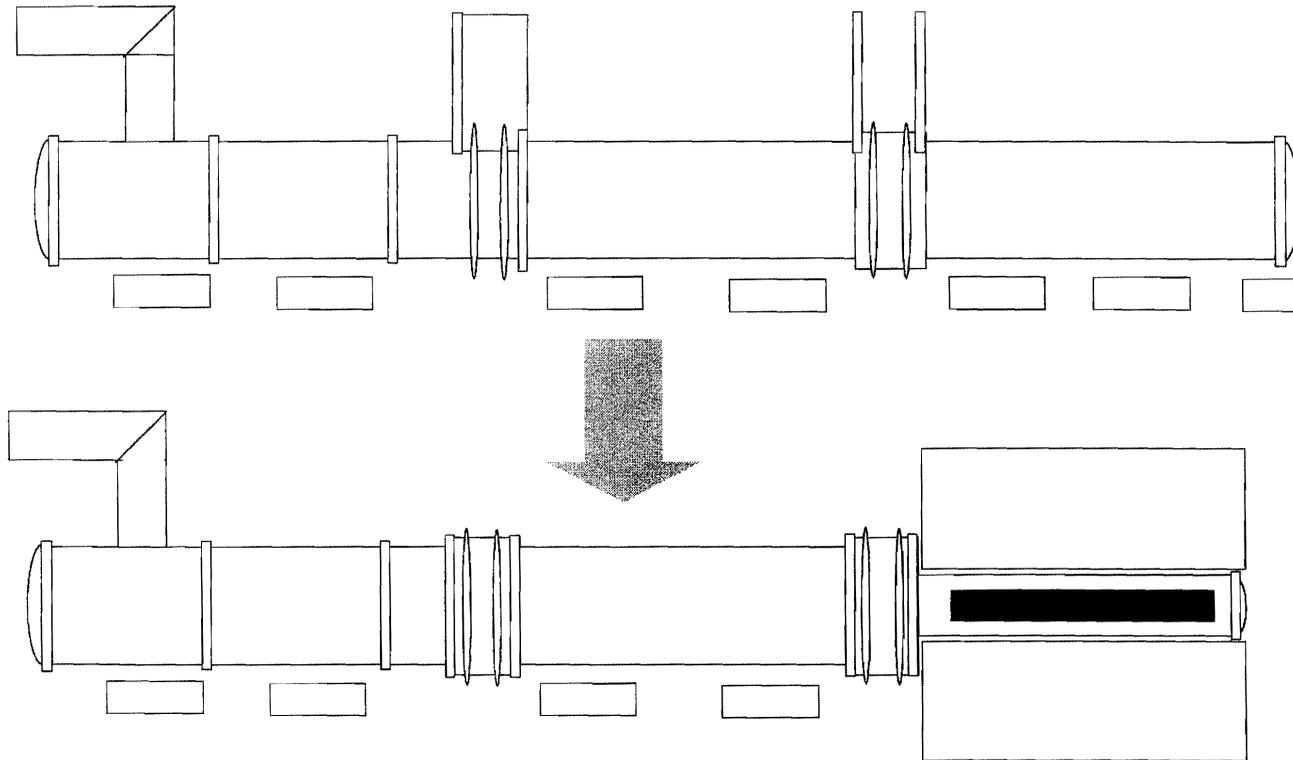
- **Définition du cahier des charges pour les essais à froid (4.2 K et 1.8 K + antenne à quench + mesures magnétiques à froid)**
- **Prévoir l'adaptation de la station d'essais du bâtiment 198 et, concevoir, si nécessaire, un cryostat pour le quadripôle modèle**
- **Etudier la possibilité d'intégrer l'aimant RMN530 dans le dispositif expérimental (nécessite un calcul électromagnétique couplé pour déterminer l'effet du champ de fuite du quadripôle sur le bobinage du solénoïde)**

Tâches à Accomplir :

Adaptation de la Station d'Essais

(préparé par P. Bredy)

Schéma du cryostat avec sa rallonge actuelle

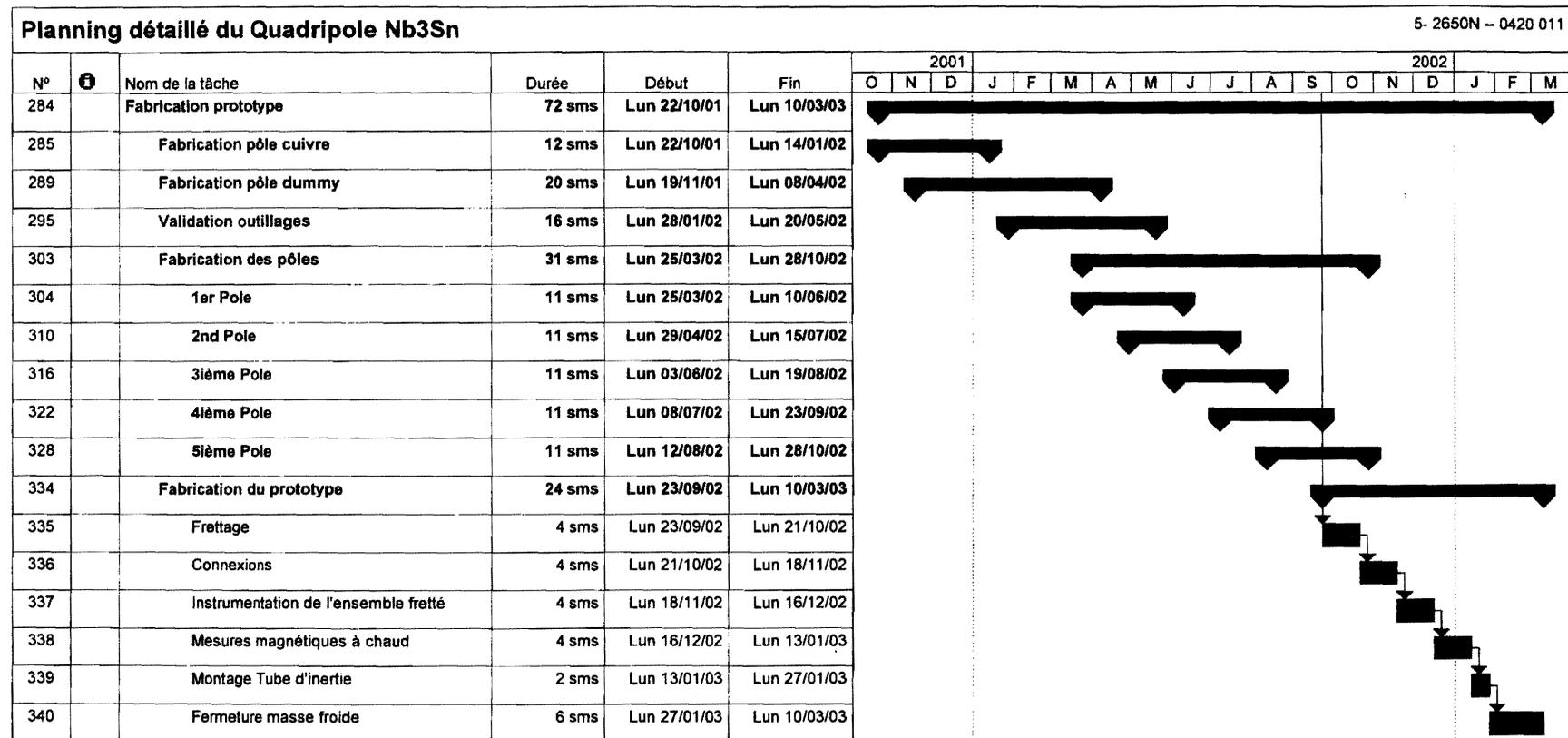


Possible évolution de la station pour essais sous champ

Planning Réactualisé : Vue de Détail

(préparé par M. Durante et C. Gourdin)

- Il est prévu de réaliser un pôle cuivre et un pôle « dummy » Nb₃Sn pour valider l'outillage et 4 + 1 pôles Nb₃Sn pour le modèle



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**
- Fabrication du pôle cuivre : à partir du **22/10/2001 (3 mois)**
- Fabrication du pôle « dummy » : à partir du **19/11/2001 (5 mois)**
- Fabrications des 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**

Outillage Nécessaire à la Réalisation du Quadripôle

• Pour réaliser le quadripôle modèle, il est nécessaire d'utiliser une partie de l'outillage des quadripôles LHC du bâtiment 122 qui est la propriété du CERN :

- *machine à bobiner*
- *outillage de pressage des têtes pour contrôle électrique*
- *machine à mesurer les modules*
- *presse de formage de l'isolation à la masse et centrale de chauffe*
- *mandrin expansible d'assemblage*
- *presse de frettage*

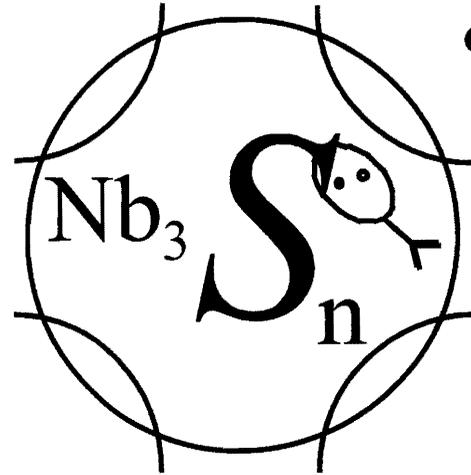
• Une demande officielle doit être envoyée sous peu à
C. Wyss

Conclusions et Perspectives

- **Un seul objectif : fabriquer le quadripôle modèle**
- **La situation est meilleure qu'il y a un an, mais l'équilibre reste précaire et le départ de M. Durante doit être compensé (mi-2001 au plus tard)**
- **Pour réussir, le projet doit être considéré comme un projet de R&D prioritaire dans le service**
- **Il faut assurer la pérennité de l'expérience acquise**

II. Etat d'avancement de la Tâche Câble

A. Devred



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

Etat d'Avancement de la Tâche Câble Nb₃Sn

Présenté par Arnaud Devred
CSTS « restreint » du 19 avril 2000

Sommaire



- **Rappel du Cahier des Charges**
- **Développement du Brin**
- **Développement du Câble**

Rappel du Cahier des Charges (1995)

- Brin et câble sont développés en conformité avec la spécification pour le câble « Outer Layer » du LHC

- Les caractéristiques spécifiques au brin Nb₃Sn sont :

Rapport cuivre-sur-non-cuivre : ≥ 1

Courant critique : $\geq 405 \text{ A}$ à 4.2 K et 7 T

Pertes (non cuivre) : $\leq 450 \text{ mJ/cm}^3$ (cycle $\pm 3\text{T}$)

- Les caractéristiques spécifiques au câble Nb₃Sn sont :

Courant critique : $\geq 12\,000 \text{ A}$ à 4.2 K et 7 T

RRR : ≥ 100 à 0 T

Minimisation des pertes par courants de couplage interbrin, tout en permettant des redistributions, avec une résistance de croisement supérieure à $20 \mu\Omega$

Modalités de la Tâche Câble

- **Alstom se charge de la production des brins et des câbles**
- **Le CEA se charge de la caractérisation des brins et des câbles produits par Alstom (dans le cadre la thèse de R. Otmani)**
- **Au démarrage, le STCM s 'est appuyé sur l 'expérience du DRFC/STEP (acquise lors du programme ITER)**

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 Nb₃Sn, 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)

Contributions du CEA à la Tâche Câble

- **Les mesures de caractérisation effectuées par le CEA incluent :**

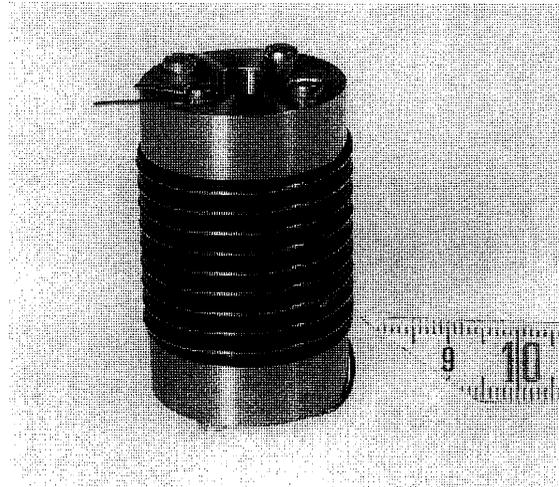
- **des mesures de courant critique sur brin (avant et après câblage)**

- **des mesures de pertes sur brin**

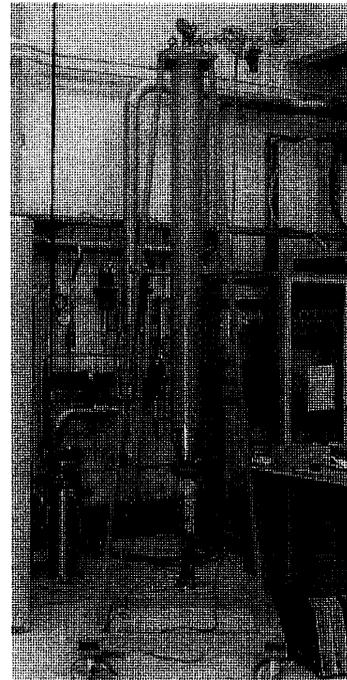
- **des mesures de résistances interbrin et de pertes sur câble**

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 (solénoïde de 12 T; bain échantillon à 4.2 et 1.8 K pressurisé)



Echantillon VAMAS



**Insert de
Mesures**



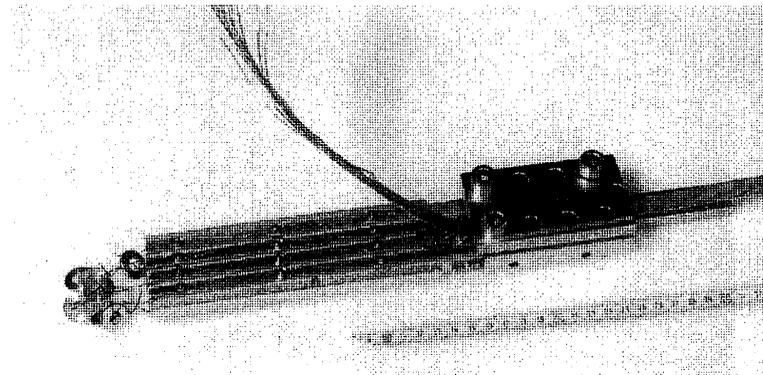
Cryostat d'Essais

CSTS du 19 avril 2000 II.7

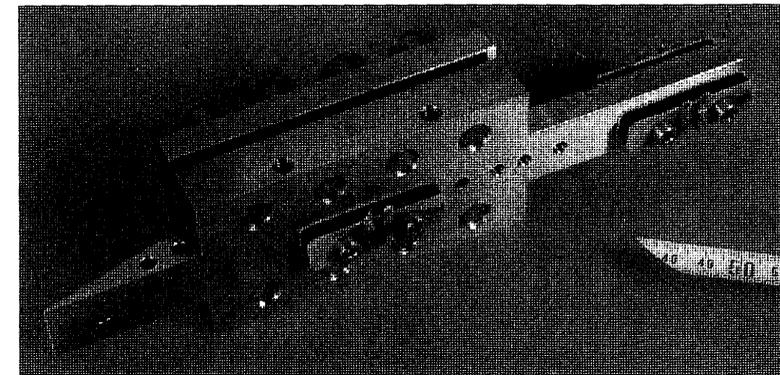
Contributions du CEA à la Tâche Câble : Mesures de Pertes

- 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 Adl, 4.2 K)

Echantillon « Plumeau »



Mesures de Résistances Interbrin



Mesures de Pertes

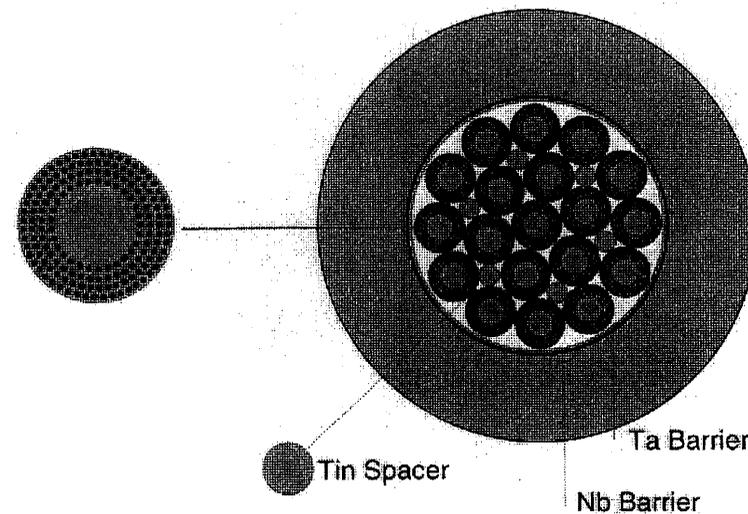
Bilan des Mesures Effectuées au CEA

	1996	1997	1998	1999	Total
Nbre de VAMAS (Gélotte)		~25	23	29	77
Nbre de Plumeaux (STEP)		1	3	1	4
Consommation Lhe	156	36 085	41 607	29 788	107 636

- **En comparaison, le Teslatron du Fermilab permet de faire des mesures de courant critique sur ~500 échantillons par an avec une consommation de 20 à 30 litres d'hélium par échantillon**

La Méthode de l'Étain Interne

- Les brins Nb₃Sn Alstom sont produits selon la méthode de l'étain interne héritée d'IGC



(d'après E. Gregory)

- Les billettes sont constituées de sous-éléments, entourés d'une barrière anti-diffusion et d'une couronne de cuivre
- Les sous-éléments sont constitués de barreaux de Nb dopés au Ta (7.5 % en poids) disposés dans une matrice de cuivre autour d'une piscine d'étain

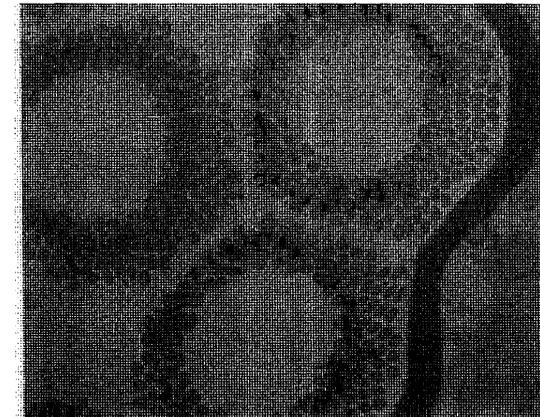
La Méthode de l'Étain Interne (suite)

- Après fabrication, les brins sont soumis à un traitement thermique (typiquement : montée à 6 °C/h jusqu'à 660 °C suivi d'un plateau à 660 °C pendant 240 h)



(avant traitement)*

- Durant le traitement, l'étain des piscines diffuse dans le cuivre de la matrice, qui devient du bronze et qui réagit avec le Nb pour former du Nb_3Sn



(après traitement)*

- Le rôle de la barrière anti-diffusion est d'empêcher les pollutions d'étain dans la couronne de Cu extérieure pour en préserver le RRR

Paramètres Etudiés pour Développer le Brin

- **Rapport cuivre-sur-non-cuivre (1.2, 1.4 et 1.8)**
- **Nombre de barrières (barrière double en Ta/Nb ou barrière unique en Ta)**
- **Nombre de sous-éléments (7 ou 19)**
- **Forme des sous-éléments (ronds ou hexagonaux)**
- **Nombre et diamètre des filaments dans les sous-éléments**

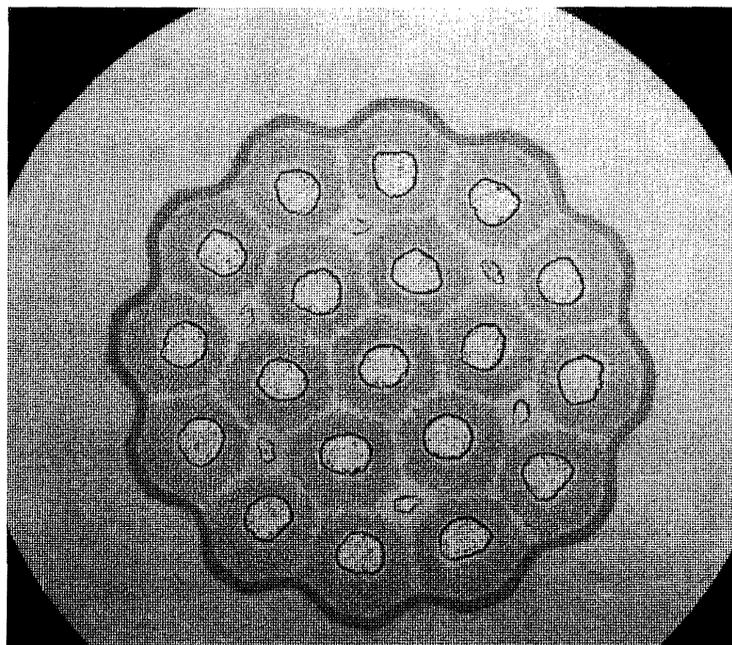
Bilan du Programme de Développement du Brin



- **Au total, Alstom a produit 10 brins différents**
- **Presque tous ces brins ont été caractérisés par le CEA (au minimum : trois mesures de courant critique et une mesure de pertes par type de brin)**

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.



- Les performances mesurées sont :

$$I_C \approx 410 \text{ A à } 4.2 \text{ K et } 7 \text{ T}$$

$$\text{Pertes} \approx 445 \text{ mJ/cm}^3 (\pm 3\text{T})$$

$$\text{RRR} \approx 195 \text{ à } 0 \text{ T}$$

Objectifs du Programme de Câblage

- **Gagner de l'expérience dans la production des câbles de Rutherford en Nb₃Sn**
- **Limiter les dégradations de courant critique liées au câblage**
- **Contrôler les résistances interbrin du câble pour limiter les effets des courants de couplage**

Paramètres Etudiés pour Développer le Câble

- Influence du rapport cuivre-sur-non-cuivre sur la dégradation de câblage (1.2, 1.4 et 1.8)
- Influence de l'insertion d'une âme en acier inox entre les deux couches de brins sur la dégradation de câblage et les résistances interbrin*

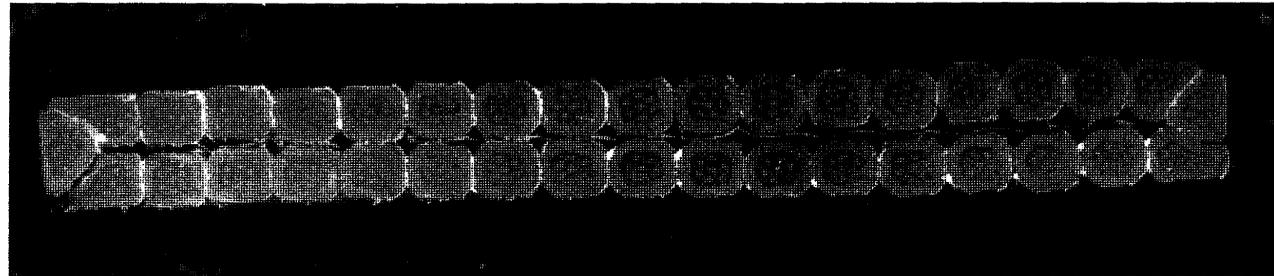
*premiers câbles de ce type produit par Alstom

Bilan du Programme de Développement du Câble

- **Au total, Alstom a produit 7 câbles différents**
- **Des mesures de courant critique ont été effectués par le CEA sur des brins extraits de 4 de ces câbles (au minimum : 3 échantillons par type de câble)**
- **Des mesures de résistance interbrin et de pertes ont été effectués par le CEA sur 3 de ces câbles (+ un câble LHC en NbTi pour référence)**
- **Le reste des câbles a été utilisé pour des essais mécaniques**

Type de 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)}

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

Résistance adjacente $\sim \text{qq}\ \mu\Omega$

^{a)} à confirmer par des mesures à l'Université de Twente sur le câble final

Performances Attendues pour le Quadripôle Modèle

- En supposant :

$$B_{C20m} \approx 30 \text{ T et } I_C \approx 13\,250 \text{ A à } 4.2 \text{ K et } 7 \text{ T}$$

- Et en supposant que les dégradations en fonction de la pression transversale sont négligeables,^{a)} on peut espérer :

$$g_{ss}(4.2 \text{ K}) \approx 235 \text{ T/m et } g_{ss}(1.9 \text{ K}) \approx 250 \text{ T/m}$$

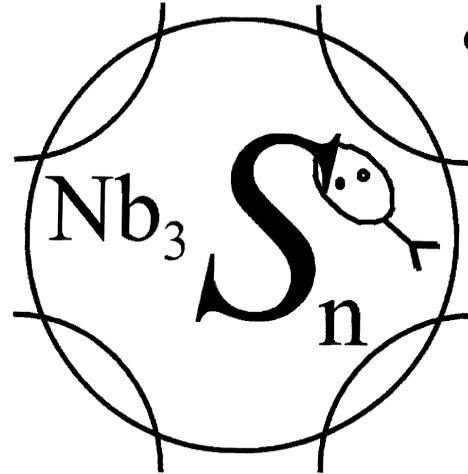
^{a)} à confirmer par des mesures à l'Université de Twente sur le câble final

Conclusions de la Tâche Câble

- Le feu vert va pouvoir être donné à Alstom pour la production des 300 m de câble (5 x 60 m) prévus par l'Accord de Collaboration
- En plus des 300 m, il est prévu de commander à Alstom (moyennant finance)
 - 100 m de câble en cuivre pour mettre au point l'outillage de bobinage et l'outillage d'imprégnation sous vide
 - 100 m de câble Nb₃Sn « dummy » pour valider la gamme de fabrication du pôle
 - 20 m de câble Nb₃Sn supplémentaires pour divers tests électriques et mécaniques

III. Etat d'avancement de la Tâche Isolation

A. Devred



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

Etat d'Avancement de la Tâche Isolation « Classique »

Présenté par Arnaud Devred
CSTS « restreint » du 19 avril 2000

Sommaire

- **Rappel du Cahier des Charges**
- **Problématique(s) de l'Isolation**
- **Etat de l'Art**
- **Programme de Développement**
- **Conclusions**

Rappel du Cahier des Charges (1995)

- Epaisseur de 110 μm par face de conducteur sous 70 MPa
- Tenue diélectrique de 75 V entre conducteurs dans les conditions normales de fonctionnement
- Doit assurer une cohésion mécanique des pôles pour permettre leur manutention et leur assemblage
- Doit permettre l'application de contraintes transversales pouvant aller jusqu'à 150 MPa sans dégradation
- Doit pouvoir subir plus de 10 cycles thermiques entre température ambiante et 4.2 K et 1000 cycles d'opération sans dégradation
- Dans la mesure du possible, tenue au rayonnement supérieure à 10^9 rad

Mise en Œuvre de l'Isolation « Conventiennelle »

- Dans la méthode « wind, react & impregnate », l'isolation du conducteur est réalisée en deux étapes :

(1) Guipage du conducteur par un ruban ou une chaussette de fibres minérales avant bobinage et traitement thermique

(2) Imprégnation de résine sous vide du bobinage après traitement thermique

Du Choix du Guipage

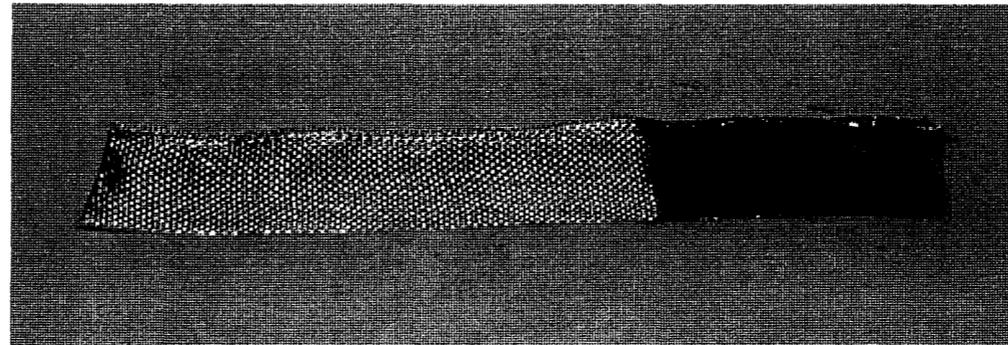
- **Pour assurer une bonne isolation électrique, il faut être sûr de sa continuité sur toute la longueur du conducteur bobiné**
- **La solution la plus simple est de réaliser un enrubannage à 50 % de recouvrement**
- **Cette solution nécessite l'utilisation d'un ruban d'épaisseur égale à la moitié de l'épaisseur tolérée entre tours, c'est à dire : 50 à 60 μm**

Du Choix de la Fibre

- **Le matériau des fibres doit supporter le traitement thermique à 660 °C pendant 240 h sans dégradation sensible de ses propriétés mécaniques**
 - **Cette contrainte exclue l'utilisation du verre E (standard) qui comporte des fondants abaissant sa température de recuit en dessous de 660 °C**
 - **Le verre R (européen) ou S2 (américain) a une meilleure tenue en température mais n'existe pas sous forme de ruban de 50 à 60 µm d'épaisseur**
- ⇒ pas de solution simple pour le quadripôle modèle**

Du Désensimage

- **Le tissu doit être désensimé avant guipage pour éviter la formation de résidus carbonés durant le traitement thermique**



Exemple de ruban de fibres de verre, non-désensimé et traité thermiquement. Le résidu carboné est révélé par trempage dans la résine d'imprégnation (d'après C. Bencharab).

- **Une fois désensimé, le tissu devient fragile et délicat à manipuler, ce qui complique le guipage et l'enrubannage**

Solution Mise en Œuvre au LBNL

- Le câble utilisé pour le dipôle modèle D20 construit et testé au LBNL, et qui a atteint un champ record de 13.5 T en mars 1997, utilise une chaussette de fibres de verre S2 d'épaisseur 0.125 mm
- La chaussette est d'abord désensimée par carbonisation dans l'air, puis trempée dans une solution d'éthanol et d'acide palmitique (acide gras, volatile, ayant des propriétés lubrifiantes), avant d'être emmanchée sur le câble

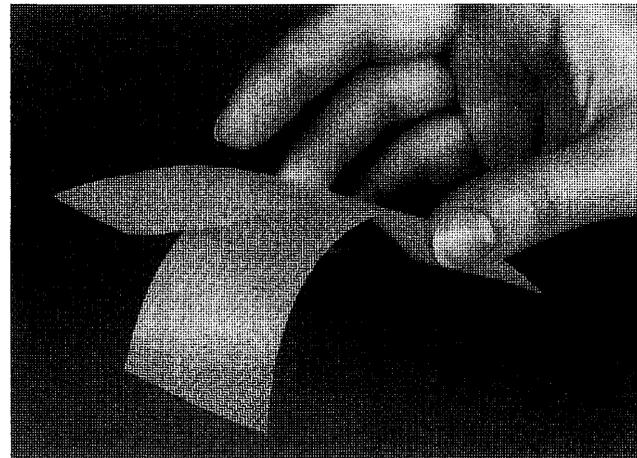
⇒ solution peu industrielle pour les grandes longueurs

Solution Mise en Œuvre à Twente

- Le câble utilisé dans le dipôle modèle MSUT construit à l'Université de Twente et testé au CERN en 1995 (et qui a atteint 11 T au premier quench) est guipé à l'aide d'un système mixte, constitué :
 - d'une bande continue de mica-verre d'épaisseur 0.1 mm, positionnée sur une face du conducteur,
 - complétée par un enrubannage bord-à-bord, réalisé à l'aide d'un ruban de fibres de verre S2 d'épaisseur 0.1 mm.
- Avec ce système, l'épaisseur totale de l'isolation entre tours est estimée à 0.28 mm, soit une épaisseur effective de 0.14 mm par face de conducteur

Problème avec la Solution de Twente

- **Le mica-verre a une mauvaise tenue mécanique**



**Exemple de mica-verre
après un cycle thermique
de désensimage**

- **L'épaisseur effective par face de conducteur est supérieure à 110 μm , ce qui nécessiterait de rogner sur le conducteur**

Solution Alternative

- En janvier 1998, B. Melot d 'Alstom nous a mis en contact avec J.M. Harry de Quartz et Silice
- Quartz et Silice est une filiale de Saint Gobain, intéressée par les marchés de haute technologie, qui produit deux types de fibres de silice de petit diamètre:
 - (1) fibres de silice « standard », avec un ensimage (plus ou moins) classique
 - (2) fibres de silice « haute température », revêtue d 'oxyde de chrome
- Ces fibres sont censées avoir une meilleure tenue en température que les fibres de verre R et peuvent être tissées sous forme de rubans de faible épaisseur

Solution Alternative (bis)

- **J.M. Harry nous donne plusieurs coordonnées de tisseurs avec qui il a déjà travaillé, parmi lesquelles nous choisissons la Société Textile Bourguisanne (STB), localisée à Bourg-Argental (42)**
- **Des commandes sont alors passées avec Quartz et Silice et la STB pour étudier la faisabilité de rubans de fibres de silice (standard et haute température) d'épaisseur 60 μm**

Choix de la Résine d 'Imprégnation

- Etant donnée la difficulté du problème concernant le choix de la fibre et du guipage, il est décidé de limiter le champ d 'investigation à la résine d 'imprégnation standard utilisée par Alstom (connue sous la dénomination F101)

Programme de Caractérisation des Différents Systèmes d'Isolation

- Vu l'intérêt potentiel des nouveaux rubans de fibres de silice, et le démarrage retardé des études de réalisation du quadripôle modèle, il est décidé de prolonger et de compléter le travail sur l'isolation en effectuant une étude comparative des différents systèmes envisagés
- 6 systèmes sont sélectionnés pour faire partie de l'étude :
 - (1) ruban de fibres de verre E seul (à demi recouvrement)
 - (2) système mixte ruban de fibres de verre E + mica-verre
 - (3) ruban de fibres de verre S2 seul (à demi recouvrement)
 - (4) système mixte ruban de fibres de verre S2 + mica-verre
 - (5) ruban de fibres de silice standard seul (à demi recouvrement)
 - (6) ruban de fibres de silice HT seul (à demi recouvrement)

Programme de Caractérisation des Différents Systèmes d'Isolation (suite)

- **4 types de tests comparatifs sont réalisés**

**(1) essais de traction sur des empilements
représentatifs de l'isolation entre tours**

**(2) tests diélectriques sur des empilements
représentatifs de l'isolation entre tours**

**(3) Mesures des caractéristiques contrainte-déformation
et du rétreint thermique sur des empilements droits de
conducteurs représentatifs du bobinage**

(4) Essais de guipage et de cintrage sur câble

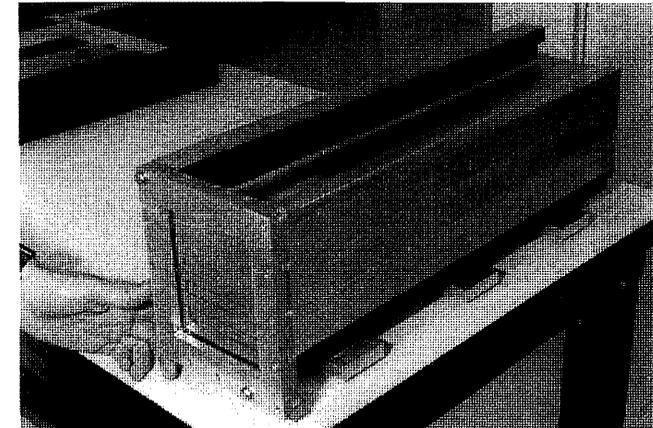
Préparation des Eprouvettes

(M. Durante, et al.)

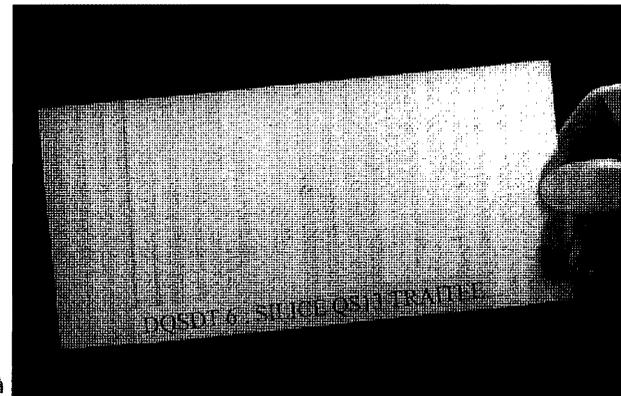
- Les éprouvettes pour les tests de traction et les tests diélectriques sont découpées dans des plaques composite



Enrubannage



Imprégnation

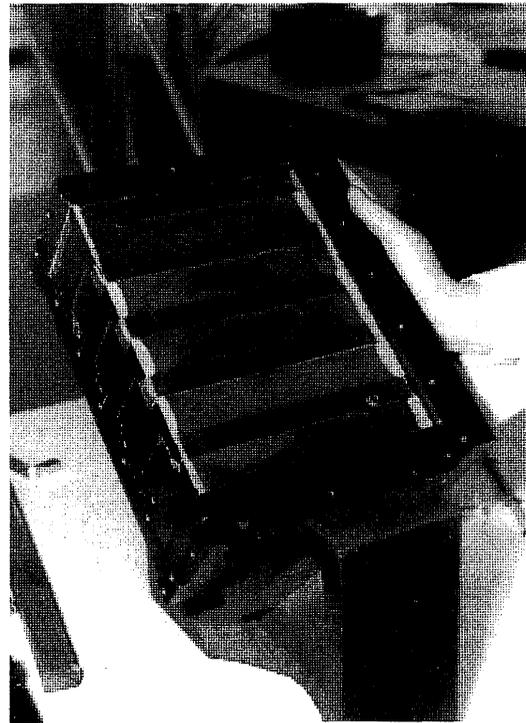


Plaque prête
pour la découpe

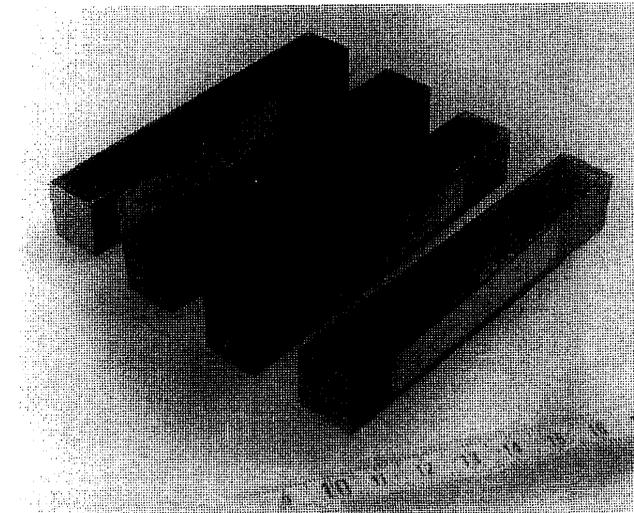
Préparation des Eprouvettes (suite)

(M. Durante, et al.)

- Les épreuves pour les tests de compression sont réagis et imprégnés dans des moules de différentes hauteurs pour étudier l'influence du dimensionnement des outillages



Imprégnation

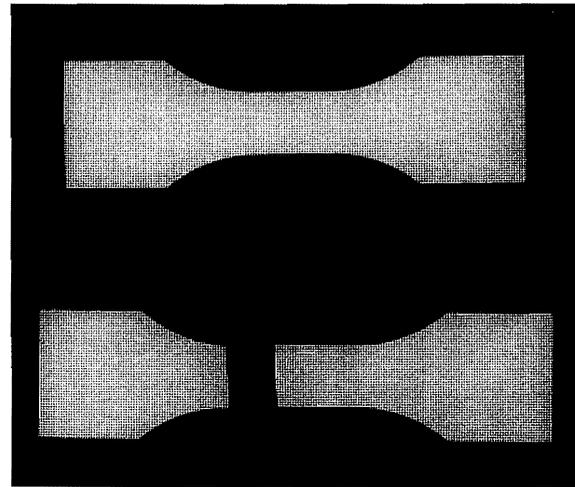


**Empilements prêts
à être testés**

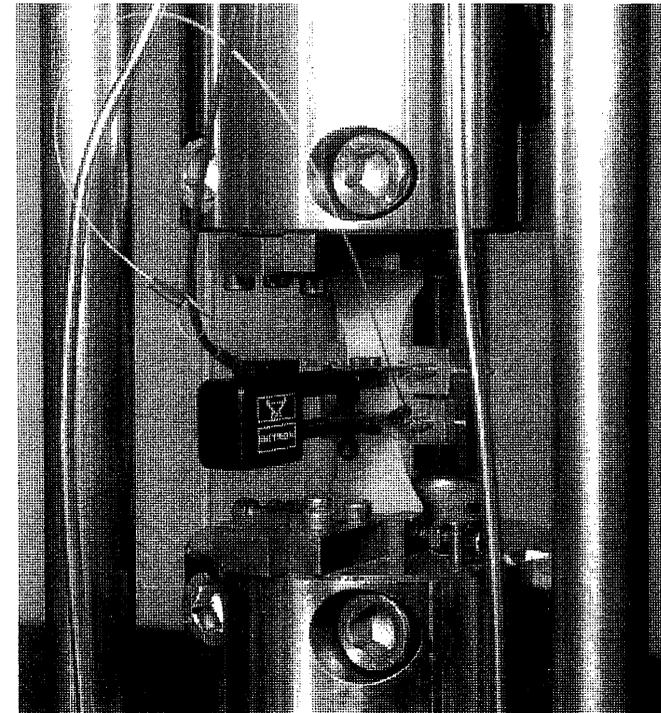
Essais Mécaniques

(M. Reytier, et al.)

- Les tests de traction, les tests de compression et les mesures de rétreint sont effectués au laboratoire d'essais mécaniques du STCM



**Echantillons de
Traction**

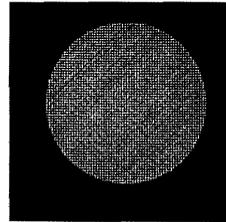


**Montage pour
Essais de Traction**

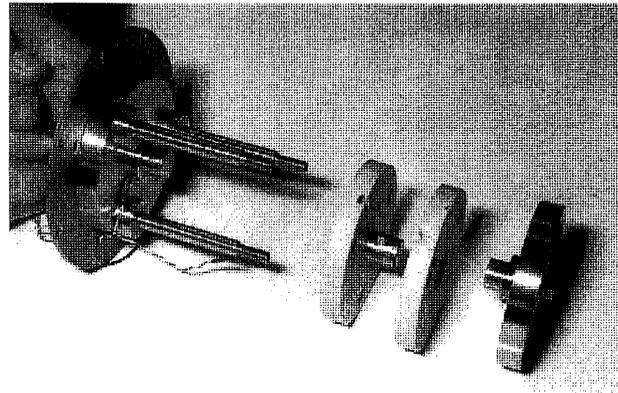
Tests Diélectriques

(P. Bredy, et al.)

- Le programme sur l'isolation a nécessité le développement d'une station de tests diélectriques (jusqu'à 5.6 kV en LHe à 4.2 K et en GHe gaz à 4.2 K, ~100 K et 300 K)

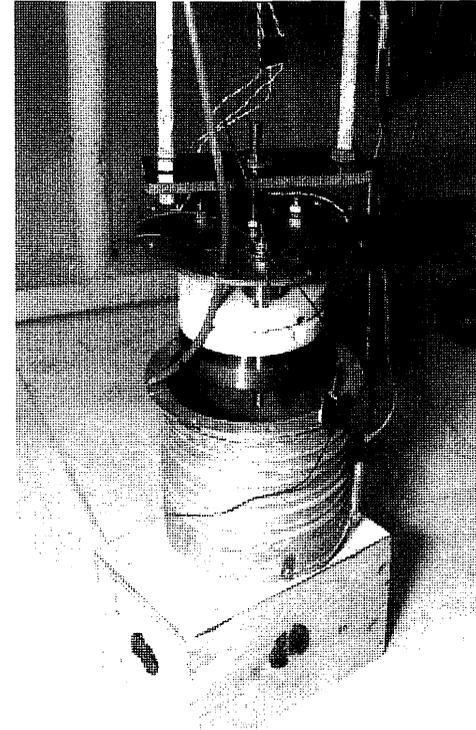


Echantillon
(\varnothing 19 mm)

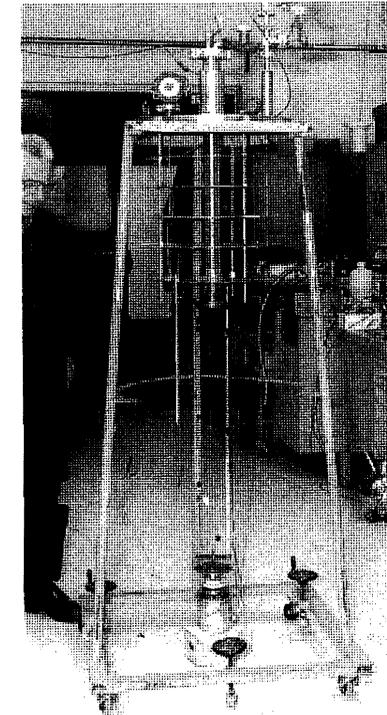


Montage

 **DSM - DAPNIA** STCM



Gamelle He



Insert de
Mesures

CSTS du 19 avril 2000 III.19

Bilan du Programme de Développement de l'Isolation « Classique »

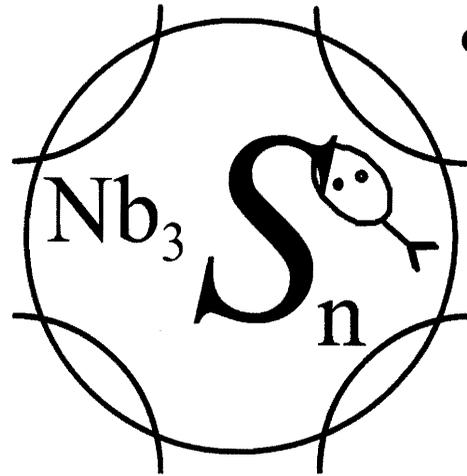
- La STB a été capable de produire 500 m de rubans de fibres de silice « standard » sans difficulté, mais a plus de mal à produire le ruban de fibres de silice « haute température » (problèmes de corrosion sur les peignes du métier à tisser)
- Le ruban de fibres de silice « standard » est assez régulier, a l'épaisseur désirée, et ne pose pas de problème particulier de mise en œuvre, il semble donc une solution viable pour le guipage du conducteur.
- La plupart des tests de caractérisation ont été réalisés et dépouillés. Ils ont permis de constituer une base de données exploitables par tous les projets

Conclusions de la Tâche Isolation « Classique »

- Un petit nombre d'échantillons de traction sont encore à tester, mais le choix du ruban de fibres de silice « standard » peut être considéré comme validé
- Le feu vert devrait pouvoir être donné à la STB d'ici l'été pour la production des 2 700 m de ruban nécessaires à la réalisation du quadripôle modèle
- Il reste à mettre au point la procédure de guipage du câble et à choisir les agents démoulants pour l'imprégnation sous vide

IV. La mécanique et la gamme de montage du quadripôle Nb₃Sn

C. Gourdin



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

La Mécanique et la Gamme de Montage du quadripôle Nb_3Sn

La Mécanique

La mécanique pour :

Assurer la qualité de champ magnétique

Dimensions géométriques

Positionnement des conducteurs

Assurer les performances de l'aimant

Reprendre les efforts de Lorentz (colliers)

minimiser les déformations de la bobine en pleine excitation

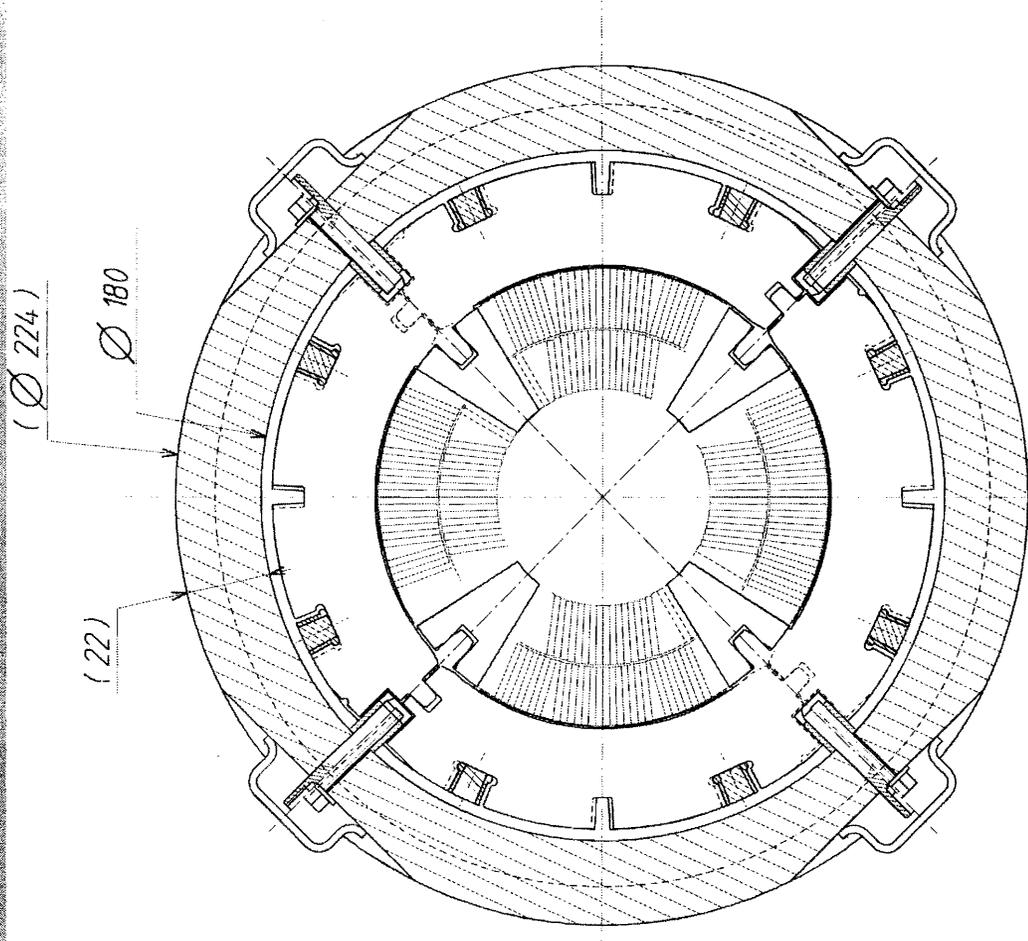
Assurer une précontrainte minimum

pour éviter tous mouvements de conducteurs

(compenser les retraits différentiels dues à la température,

compenser les contraintes engendrées par les forces de Lorentz)

Section droite du quadripôle



CEA - Saclay
NB3SN
Coupe masse froide

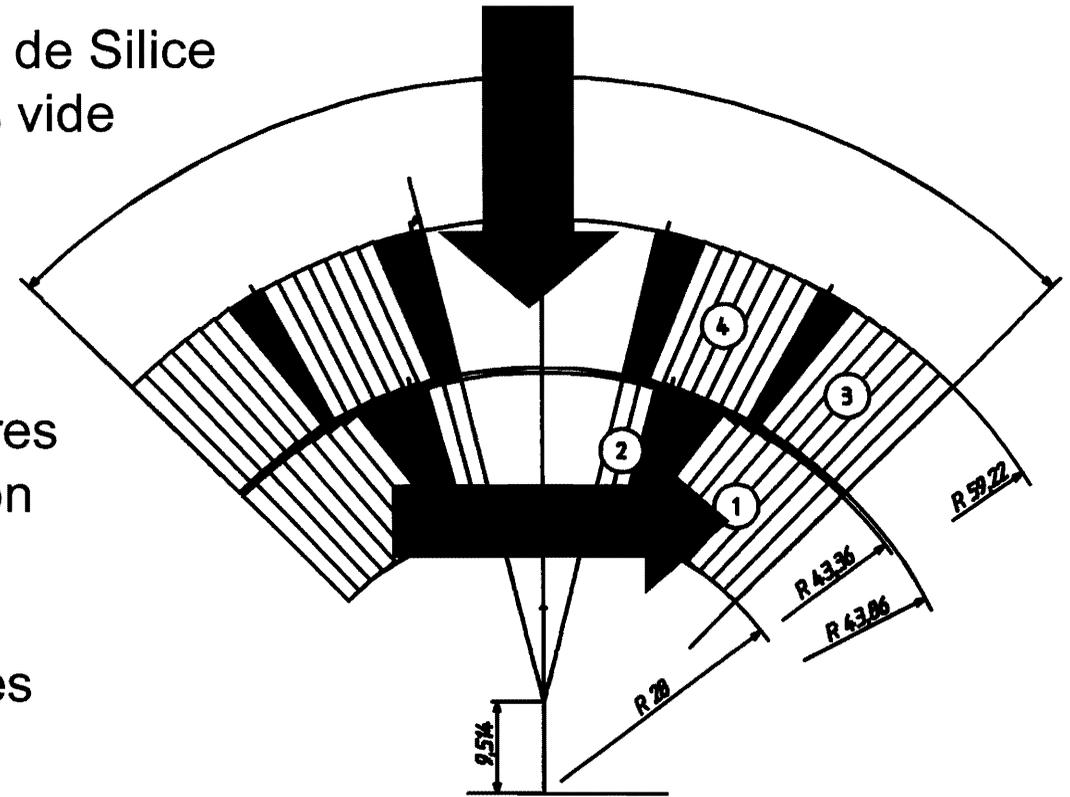
LHC02_4.00_M64.0_PO-NB3SN

D'après J. Thinel

Les principales options choisies pour la section droite du quadripôle Nb3Sn

Les BOBINES

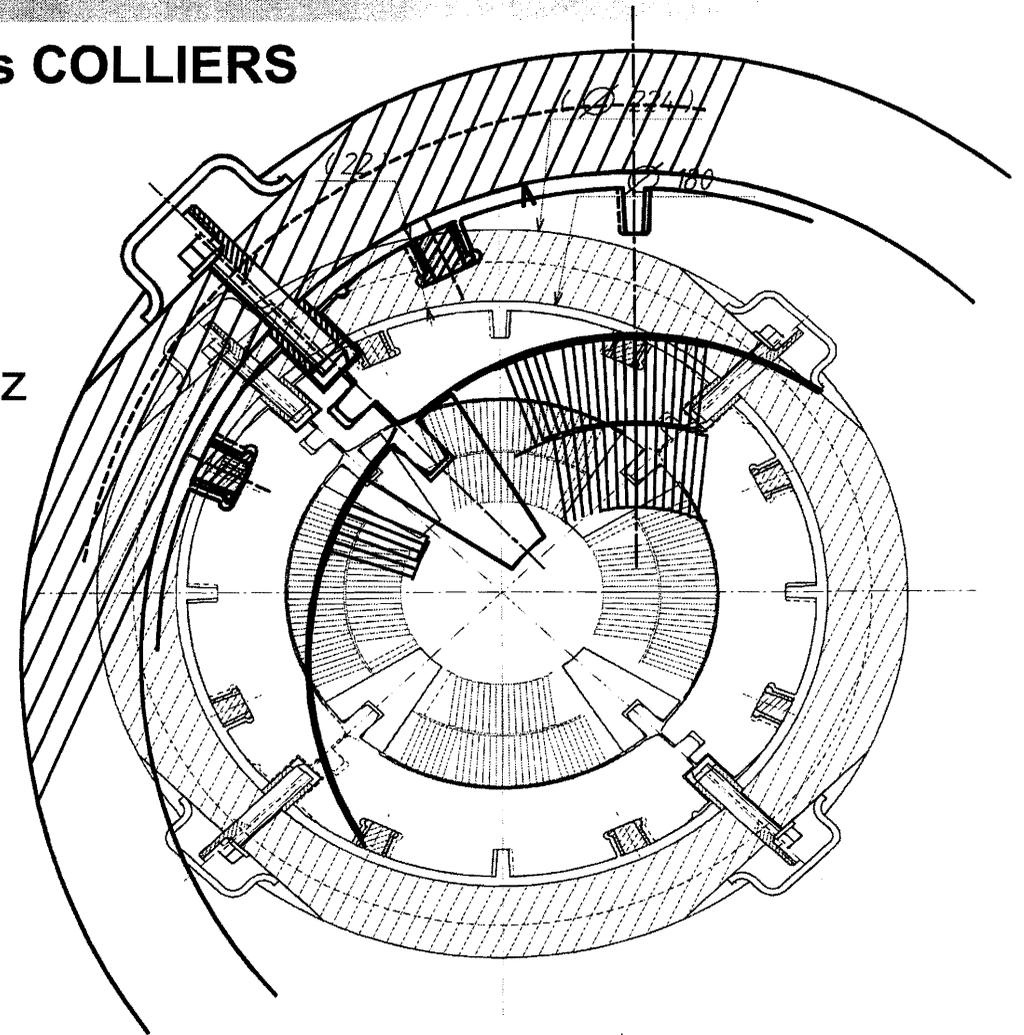
- Isolation des conducteurs
guipage de tissu de fibre de Silice
et une imprégnation sous vide
de la bobine
- Les cales polaires font partie
intégrante de la bobine
- Matériau pour les cales angulaires
doit tenir le traitement de réaction
(660°C pendant 240 heures)
- Pas de connexions inter-couches
- Connexions Nb3Sn-NbTi
- Connexions interpoles en NbTi



Les principales options choisies pour la section droite du quadripôle Nb3Sn

Les COLLIERS

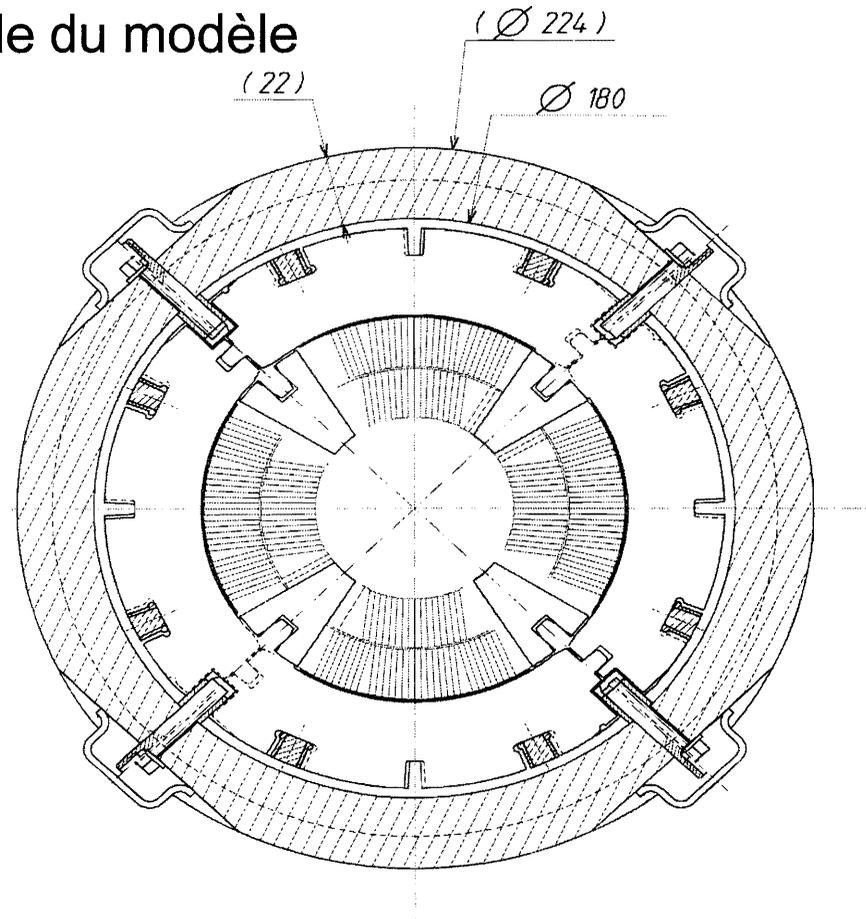
- Utilisation de la géométrie extérieure des colliers des quadripôles LHC
- Supportent les efforts de Lorentz
- Guidage par un doigt s'insérant dans la cale pole
- Contrainte appliquée par les clavettes
- Utilisation de lardons et de clavettes



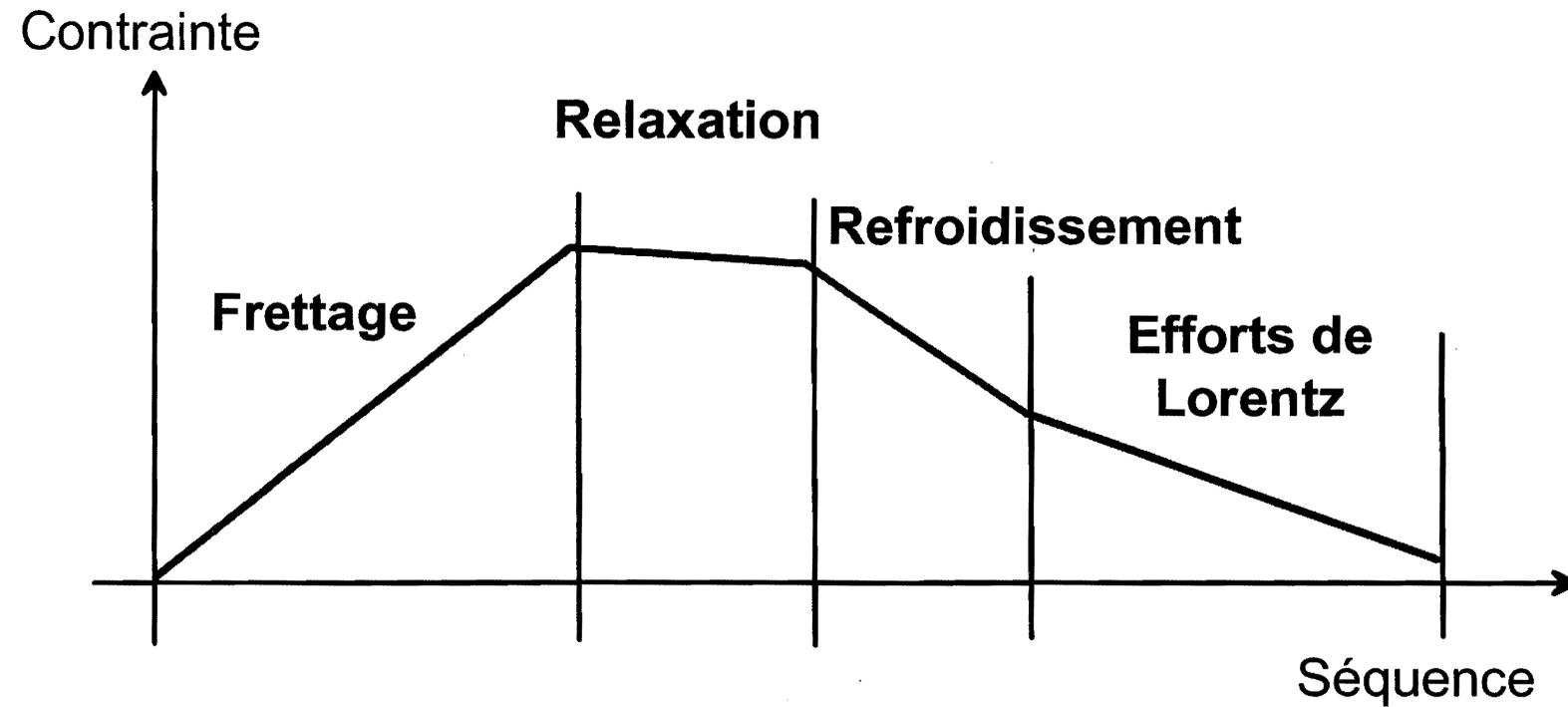
Les principales options choisies pour la section droite du quadripôle Nb3Sn

TUBE D'INERTIE

Rigidité axiale du modèle



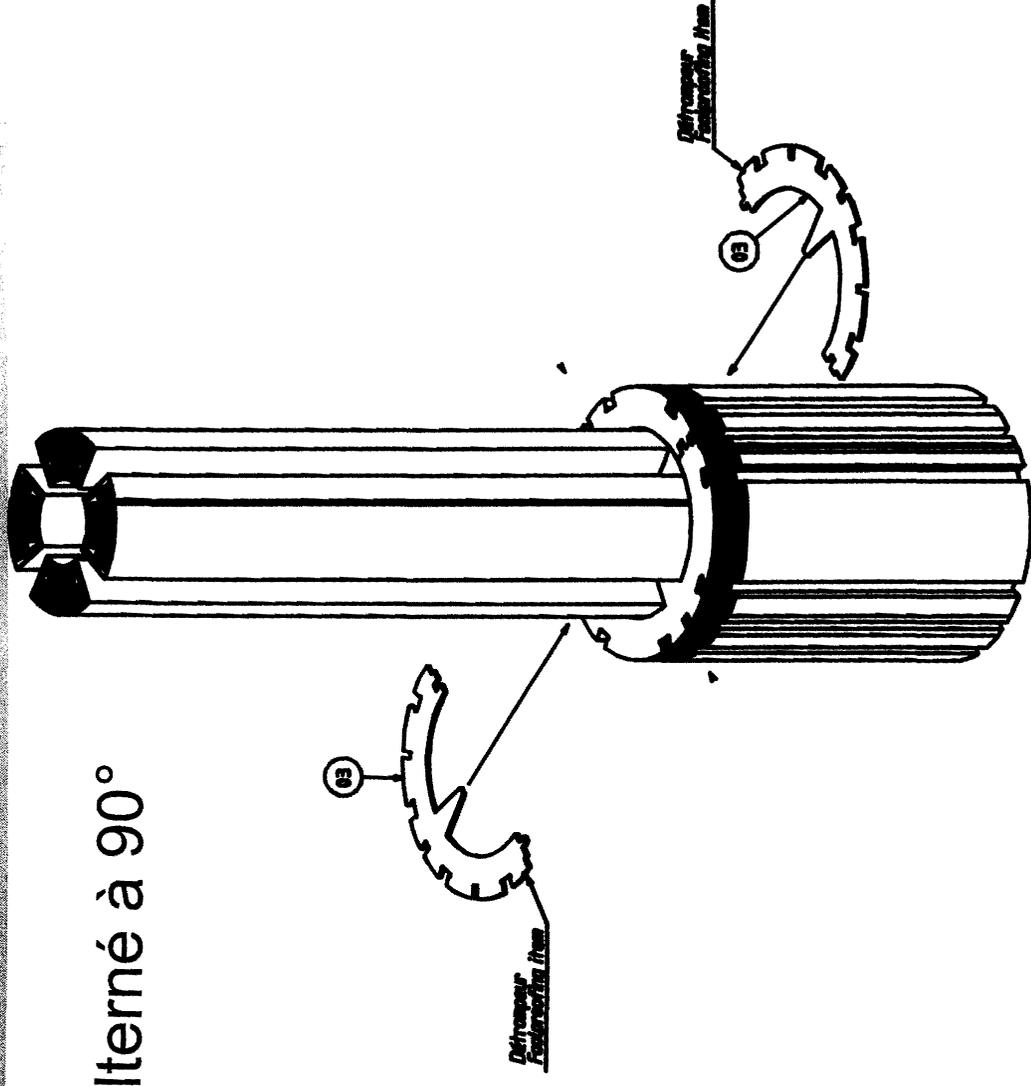
Frettage du quadripôle



Rayon intérieur des colliers < rayon extérieur des bobines

Frettage du quadripôle

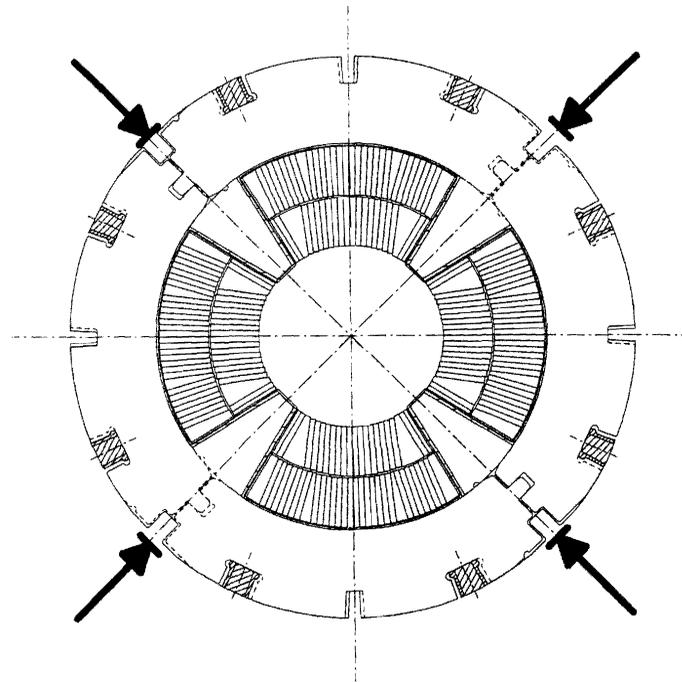
Empilement alterné à 90°



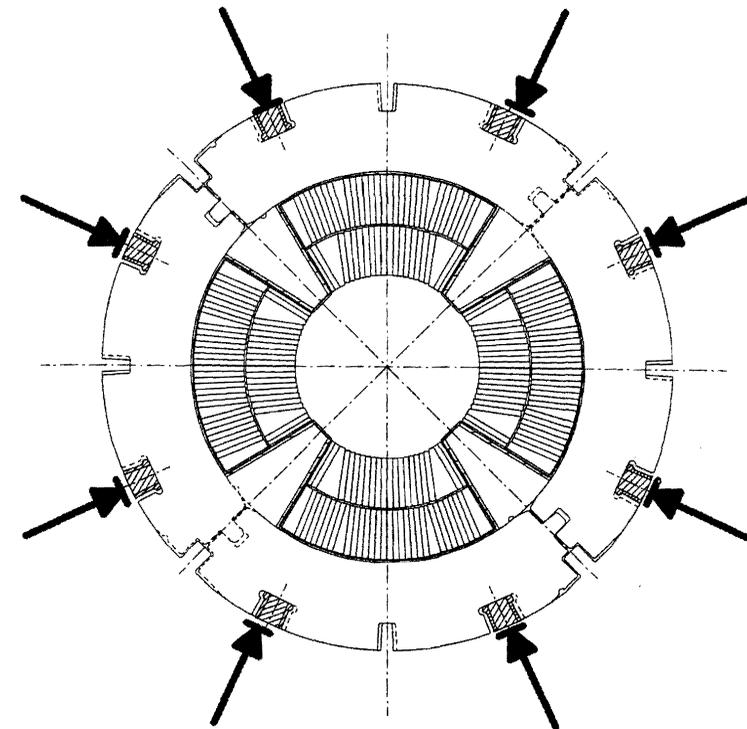
Frettage du quadripôle

Principe du frettage
2 étapes

Pressage avec des longérons



Frettage via les clavettes



Modélisation mécanique avec CASTEM 2000

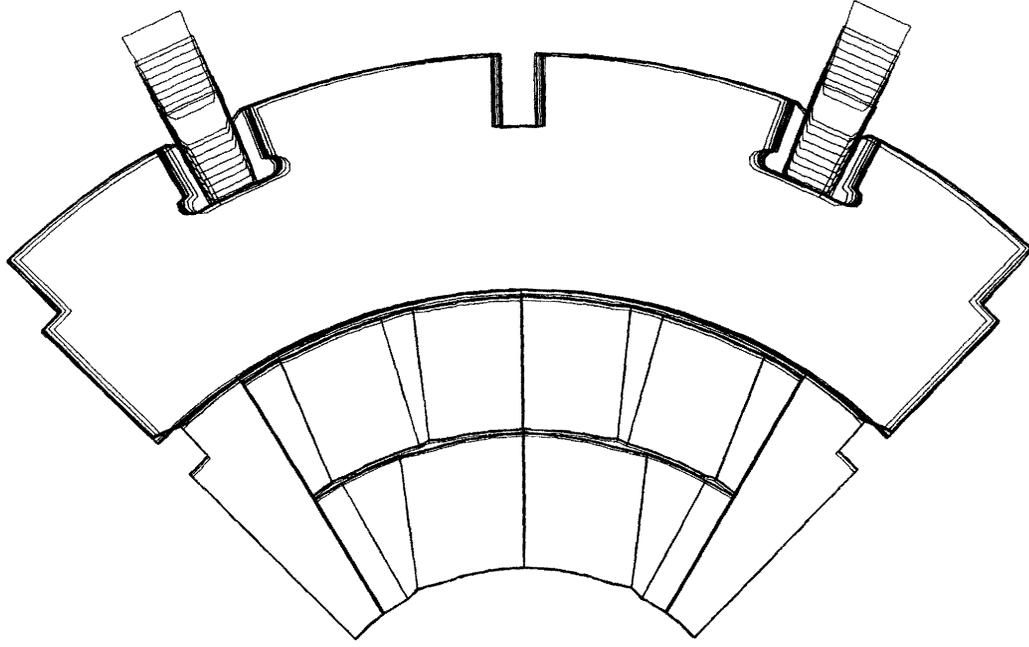
Objectifs

- Validation de l'utilisation d'une cale polaire permanente
- Validation du positionnement des colliers par rapport aux bobines (doigt de guidage)
- Validation du système du frettage
 - **Distribution de la contrainte**
 - Efforts à imposer sur les clavettes
 - Etude de la plastification durant le frettage
- Détermination des dimensions des bobines et des intervalles de tolérances

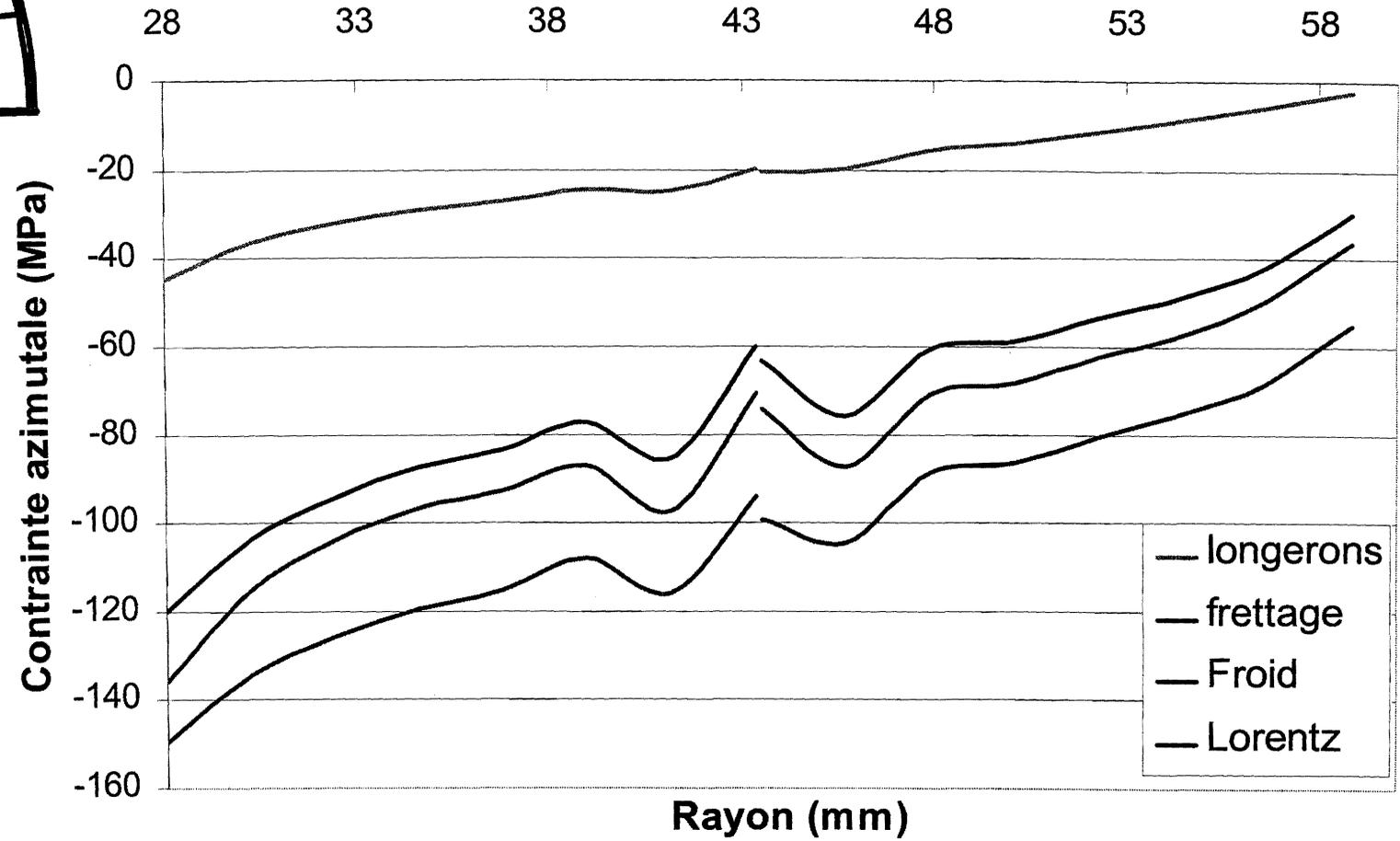
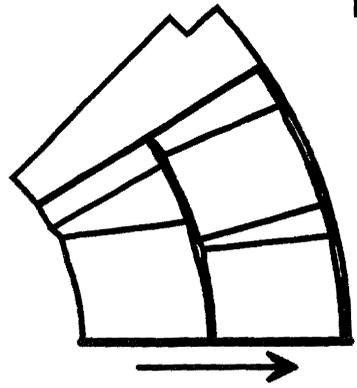
Les propriétés matériaux

Matériau	Temp. K	Contrainte à rupture	Module d'élasticité (GPa)	Contrainte élastique	Coefficient de retrait thermique intégré
Acier Collier 13Rm19	300	846	210	475	-
	4.22	1620	210	1088	-2.9
Acier Clavettes	300	596	210	275	-
	4.22	1570	210	666	-2.9
Acier Lardon	300	596	210	275	-
	4.22	1570	210	666	-2.9
Alliage cale pôle	300	-	110	-	-
	4.2	-	110	-	-3.6
Isolation Kapton	300	-	4	-	-
	4.2	-	4	-	-6
Bobine en Nb3Sn	300	-	30	-	
	4.2	-	42	-	-3.9

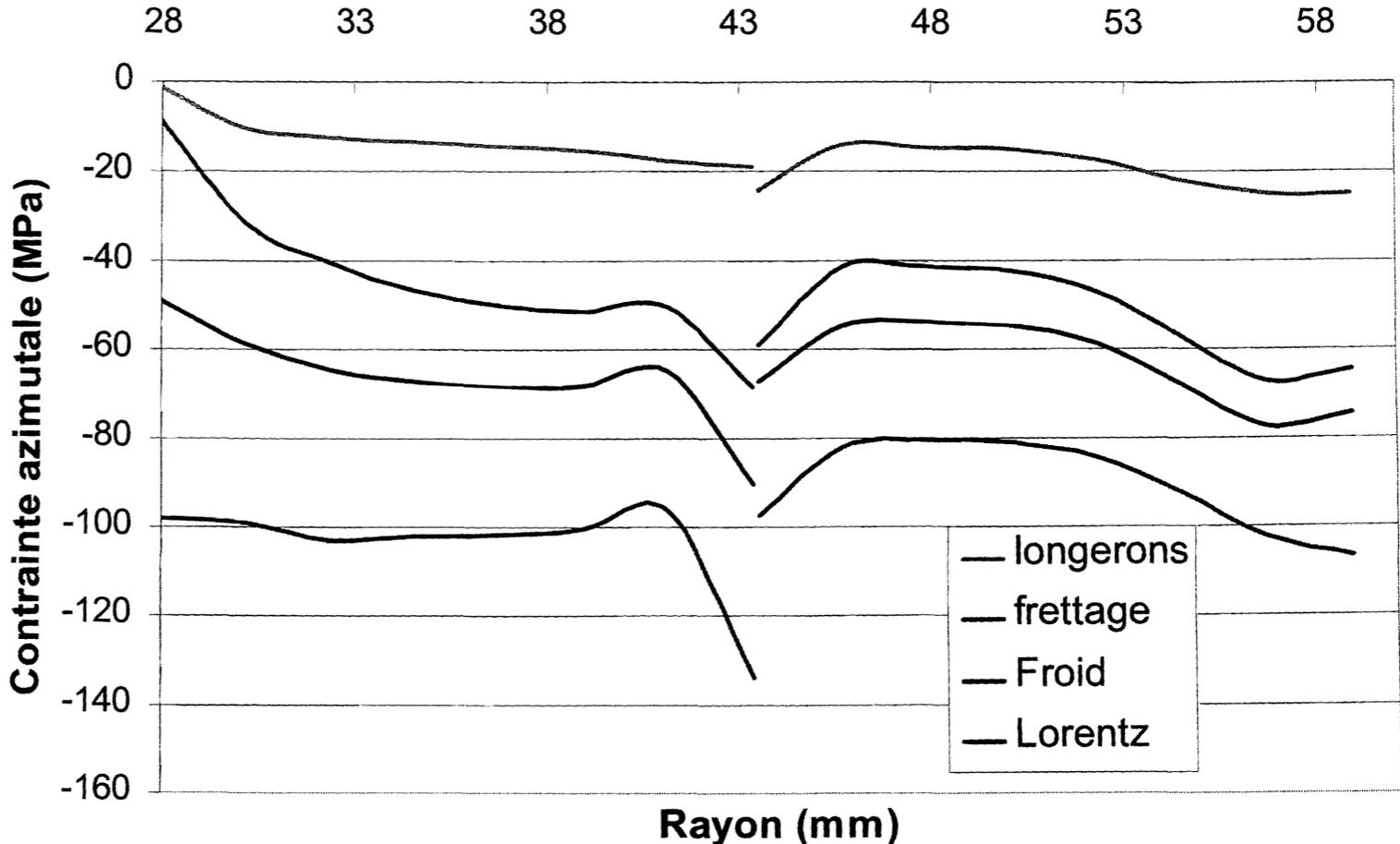
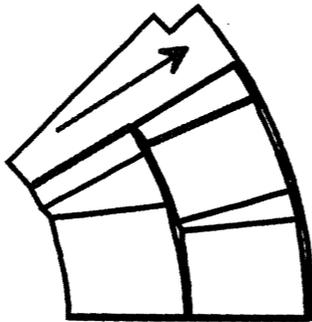
La déformée de la section droite

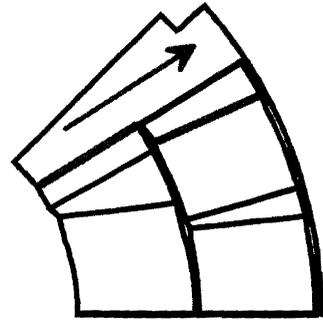


Evolution des contraintes sur le plan médian

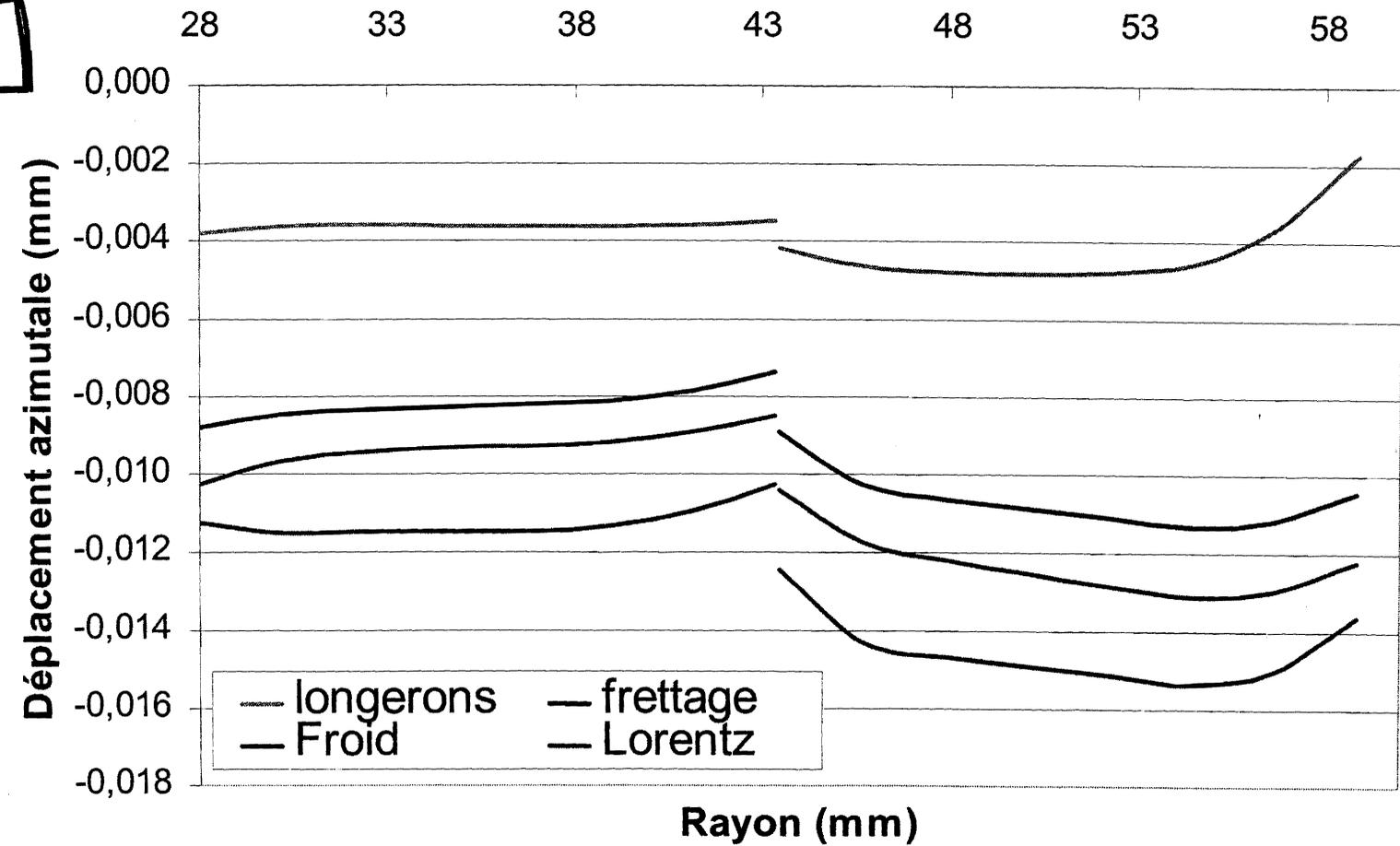


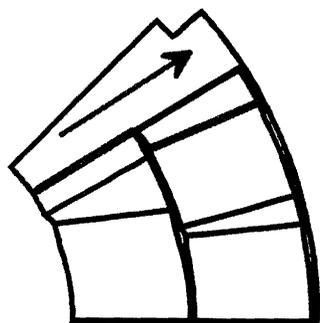
Evolution des contraintes sur le plan polaire



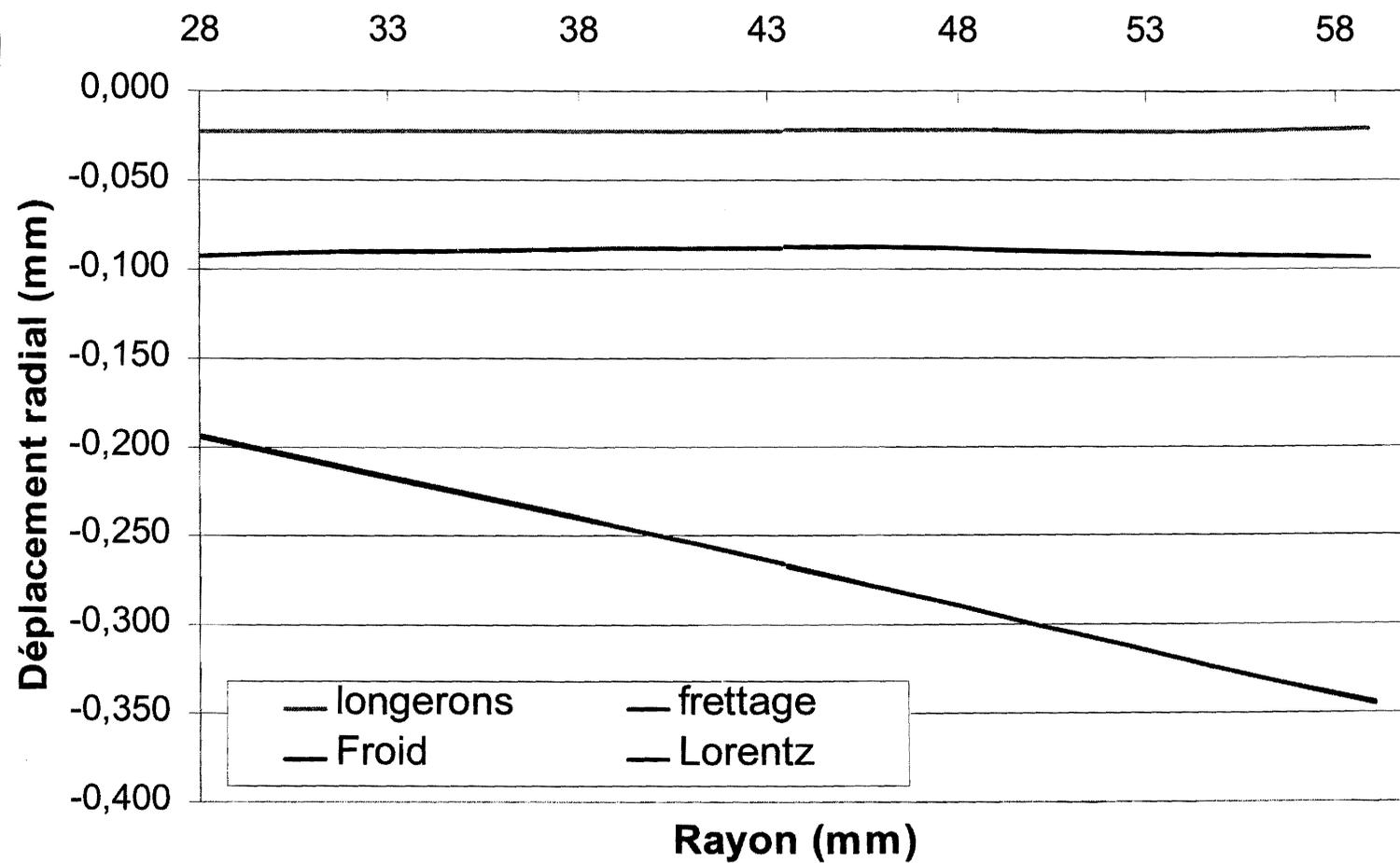


Les déplacements dans la bobine Azimutaux sur le plan polaire

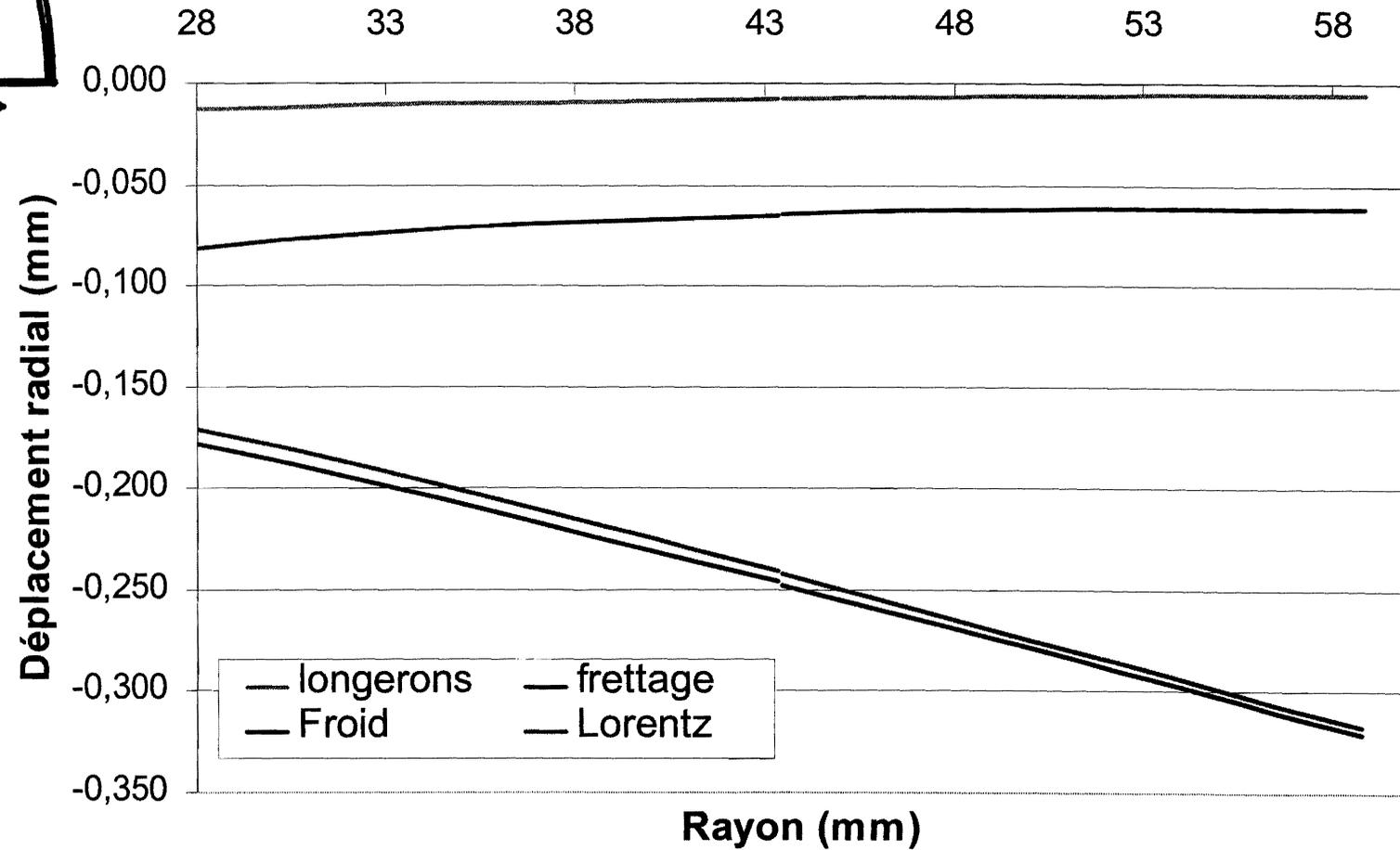
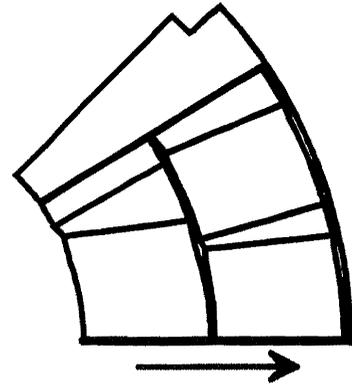




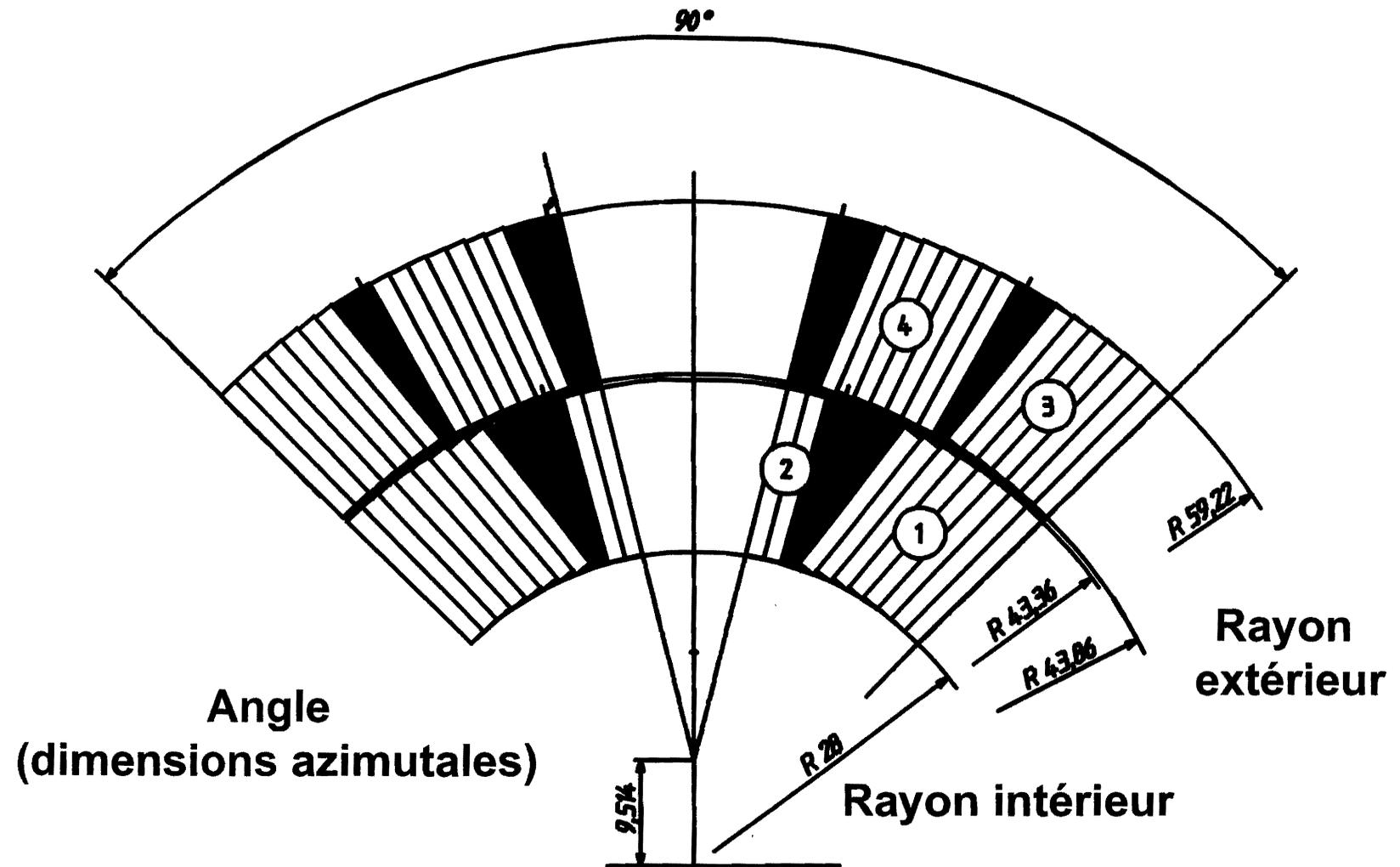
Les déplacements dans la bobine Radiaux sur le plan polaire



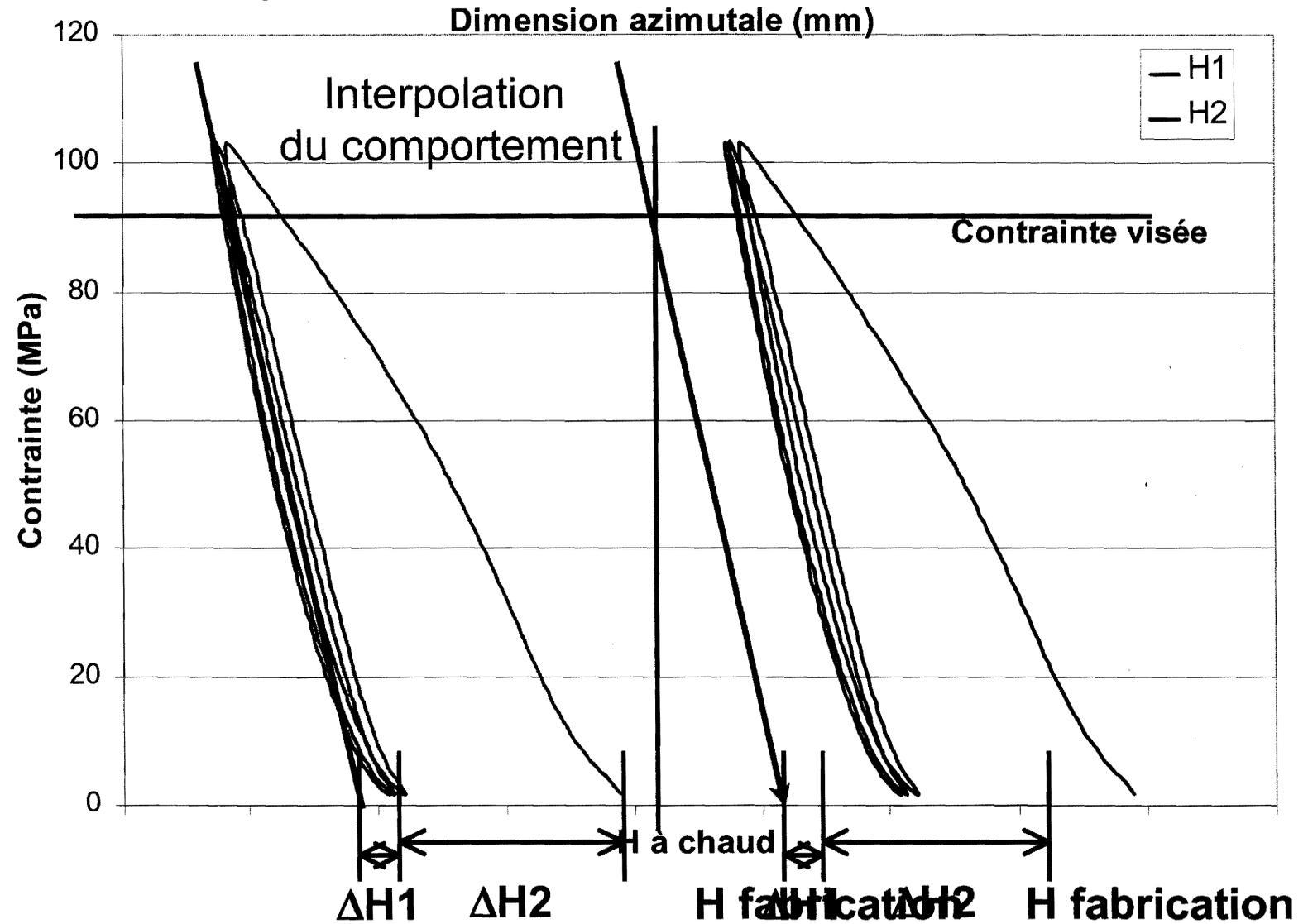
Les déplacements dans la bobine Radiaux sur le plan médian



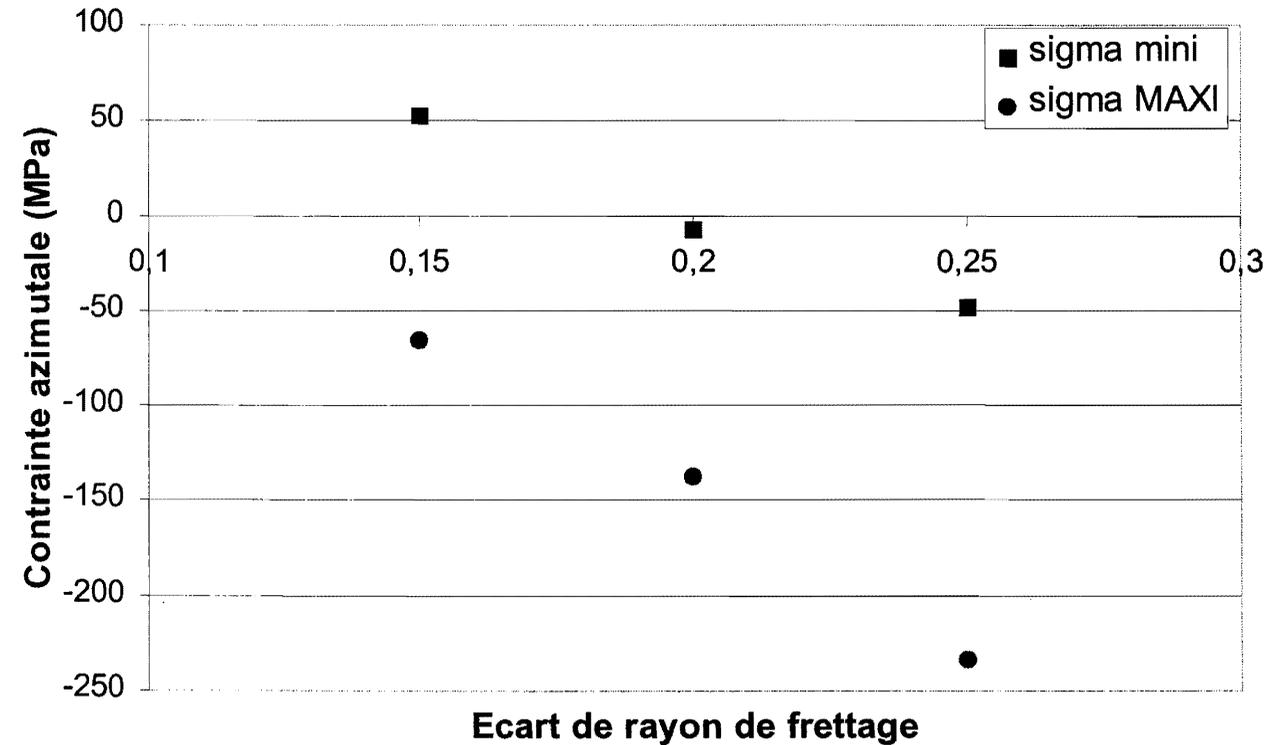
Détermination des dimensions azimuthales et radiales pour la fabrication des bobines



Détermination des dimensions azimuthales et radiales pour la fabrication des bobines



Analyse des tolérances sur le rayon des bobines



Variation de **0.05 mm** sur le rayon extérieur de la bobine

engendre une variation d'environ **55 MPa** sur la contrainte azimutale

Conclusions du calcul numérique

Prédimensionnement du conducteur

Lancement de la fabrication du conducteur et de l'isolation

Validation du process de frettage

Contrainte dans le bobinage < 150 MPa
Toujours en compression

Conception de la section droite

Lancement des études avec le Bureau d'Etudes

Conception de la bobine

Faisabilité des espaceurs de tête en matériau céramique

Test de jonction Nb₃Sn-NbTi en cours de réalisation

Gamme de montage

Note interne n°: 5- 2650N -- 1500 004 99

4 phases dans la fabrication du modèle

- Fabrication des pôles
- Assemblage du quadripôle
- Assemblage de la masse froide
- Montage dans la station d'essai

Gamme de montage

Fabrication d'un pôle

Liste des composants

- Conducteur isolé
- Cales angulaires
- Cales pôles
- Espaceurs de tête
- Renforts isolants dans les têtes
- Boite de connexion Nb₃Sn-NbTi
- Isolation inter-couche

Nombre de pôles : 7

Gamme de montage

Fabrication d'un pôle

Liste des étapes

- **Bobinage**
 - Dédoublage du conducteur
 - Formage du changement de couche
 - Bobinage de la première couche
 - Mise en place de l'isolation inter-couche
 - Bobinage de la seconde couche
- Préparation des connexions Nb₃Sn-NbTi
- Réaction
- Transfert du moule de réaction au moule d'imprégnation
- Réalisation des connexions Nb₃Sn-NbTi, étanchéité du moule

Gamme de montage

Fabrication d'un pôle

Liste des étapes

- Imprégnation sous vide
 - Démoulage du pôle (agent démoulant)
- Précyclage et mesure des dimensions azimutales
- Tests électriques
- Instrumentation

Gamme de montage

Fabrication d'un pôle

Liste des principaux outillages

- Moule de réaction et de bobinage
- Machine à bobiner
- Four de réaction
- Moule d'imprégnation
- Four d'imprégnation
- Machine à mesurer les modules
- Machine de tests électriques des têtes sous pression

- Outillages de transfert et de manutention des pôles et moules

Gamme de montage

Assemblage du quadripôle

Liste des principaux composants

- Isolation à la masse
- Chauffelettes
- Colliers
- Longérons, lardons et clavettes

Gamme de montage

Assemblage du quadripôle

Liste des principales étapes

- Formage de l'isolation à la masse
- Assemblage des pôles sur le mandrin
- Mise en place des chaufferettes et de l'isolation à la masse
- Empilement des colliers alternés à 90°
- Frettage
 - Pressage via les longerons
 - Pressage via les clavettes
- Extraction du mandrin d'assemblage
- Réalisation des connexions inter-pôles
- Instrumentation du modèle

Gamme de montage

Assemblage du quadripôle

Liste des principaux outillages

- Presse de Formage de l'isolation à la masse
- Mandrin d'assemblage des pôles
- Tour d'empilement
- Presse de Frettage
- Outillage de réalisation des connexions inter-pôles

- Outillage de manutention du modèle

Gamme de montage

Assemblage de la masse froide

Liste des composants

- Tube d'inertie
- Clavettes de centrage

Liste des étapes

- Mise en place du tube d'inertie
- Instrumentation

Gamme de montage

Montage dans la station d'essais

Tests à froid

éventuellement avec l'aimant RMN530

Gamme de montage

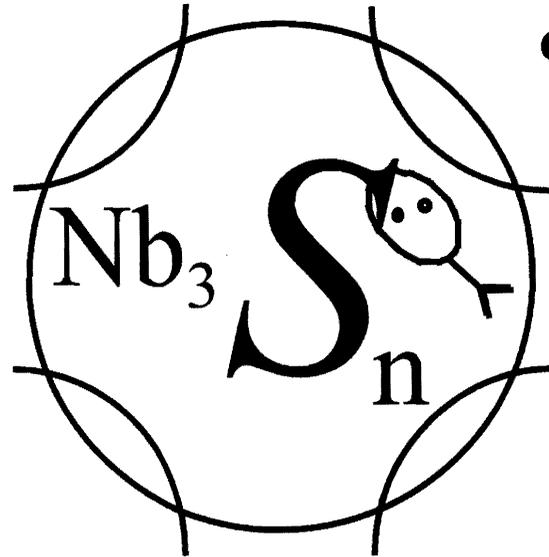
Conclusions

- Fabrication des pôles
- Assemblage du quadripôle
- Assemblage de la masse froide
- Montage dans la station d'essai

V. Etat d'avancement de la Tâche

Etude de Jonction

F. Streiff



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

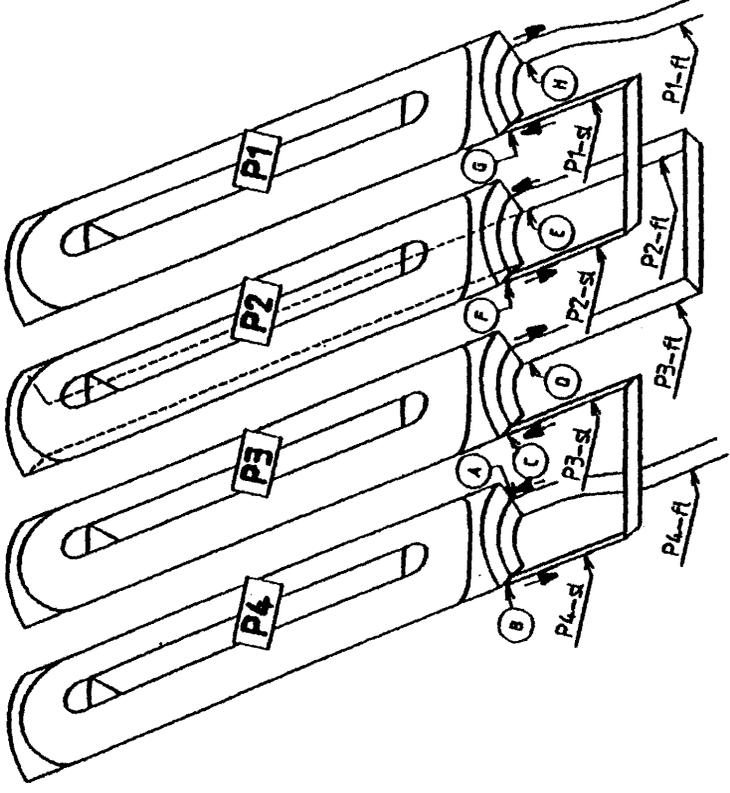
**Service Technique de Cryogénie
et de Magnétisme**

ETAT D'AVANCEMENT DE LA TACHE ETUDE DE JONCTION

F. Streiff-Scientifique du Contingent

POURQUOI DES JONCTIONS $\text{Nb}_3\text{Sn-NbTi}$?

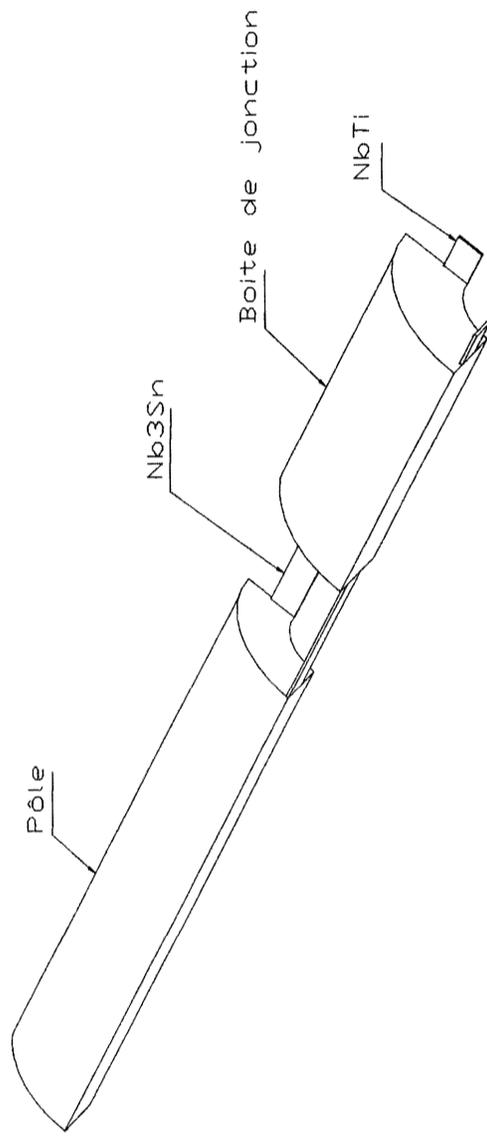
- **Reprendre le design et le processus de la réalisation des connexions interpoles du quadripôle LHC.**



PRINCIPE DES CONNEXIONS INTERPOLES

POURQUOI DES JONCTIONS Nb₃Sn-NbTi ?

- **Reprendre le design et le processus de la réalisation des connexions interpoles du quadripôle LHC.**
- **Mais une fois formé, le Nb₃Sn devient trop fragile pour être manipulé ⇒ connexion Nb₃Sn-NbTi**



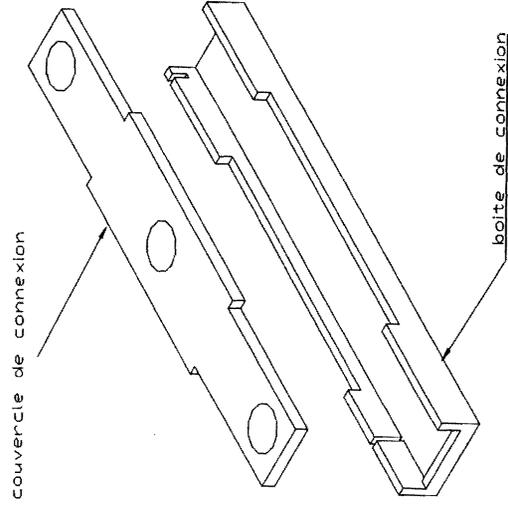
Position de la boite de connexion Nb3Sn-NbTi

LES DIFFICULTES DE LA MISE EN ŒUVRE DE LA JONCTION Nb₃Sn-NbTi

- **Même configuration des câbles en amont et aval de la boîte.**
- **Il faut 2 boîtes:**
 - **une pour le traitement thermique,**
 - **une pour la connexion.**
- **La géométrie et le matériau de la boîte doivent permettre une procédure de soudage adéquate.**
- **L'imprégnation sous vide impose une condition d'étanchéité sur la boîte.**
- **La résistance électrique doit être la plus faible possible.**

PROCEDURES DE MONTAGE

- **Les câbles seront soudés dans une boîte en cuivre.**

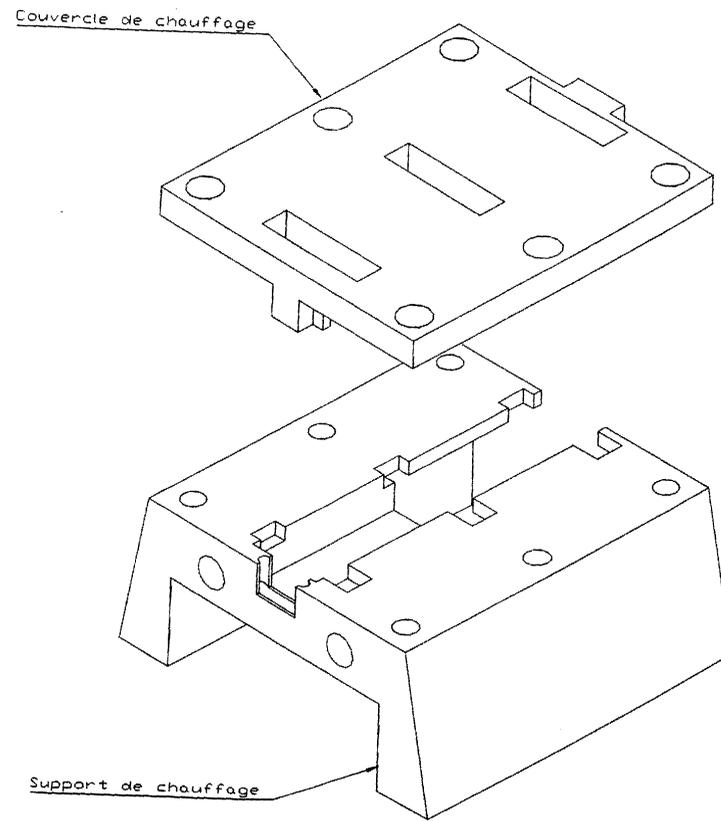


BOITE DE CONNEXION Nb3Sn-NbTi

PROCEDURES DE MONTAGE

- **Les câbles seront soudés dans une boîte en cuivre.**

**La moitié de cette boîte est soutenue par un support en G11.
L'autre moitié est en contact avec une pièce en aluminium
chauffée par des résistances électriques.**



DISPOSITIF DE CHAUFFAGE

PROCEDURES DE MONTAGE

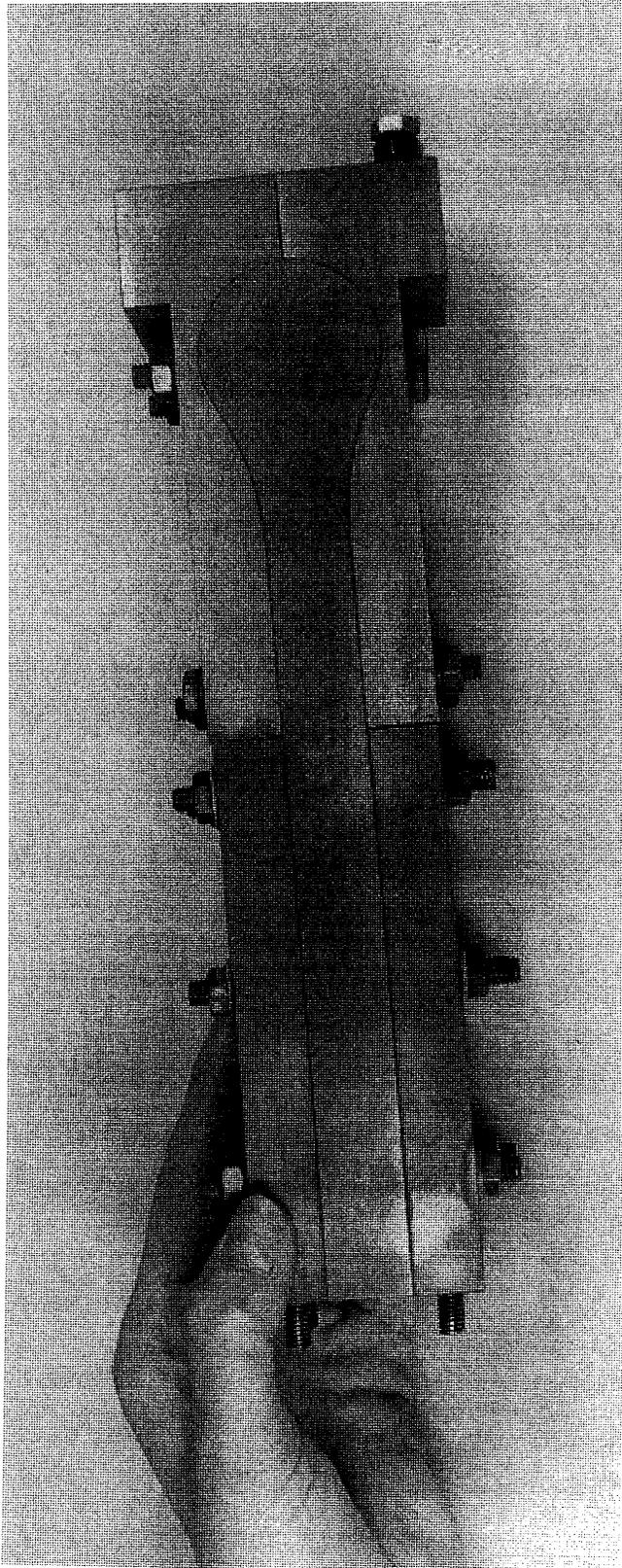
- **Les câbles seront soudés dans une boîte en cuivre.**
La moitié de cette boîte est soutenue par un support en G11.
L'autre moitié est en contact avec une pièce en aluminium chauffée par des résistances électriques.
- **Cette technique de soudage constitue un processus contrôlé et bien défini.**

DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET ESSAIS

- **Buts:**
 - valider le processus de la réalisation des connexions.
 - mesurer la résistance de la jonction.
- **Moyen:**
 - la station d'essais des jonctions CMS (champ jusqu'à 4 T et courant échantillon jusqu'à 10 kA).

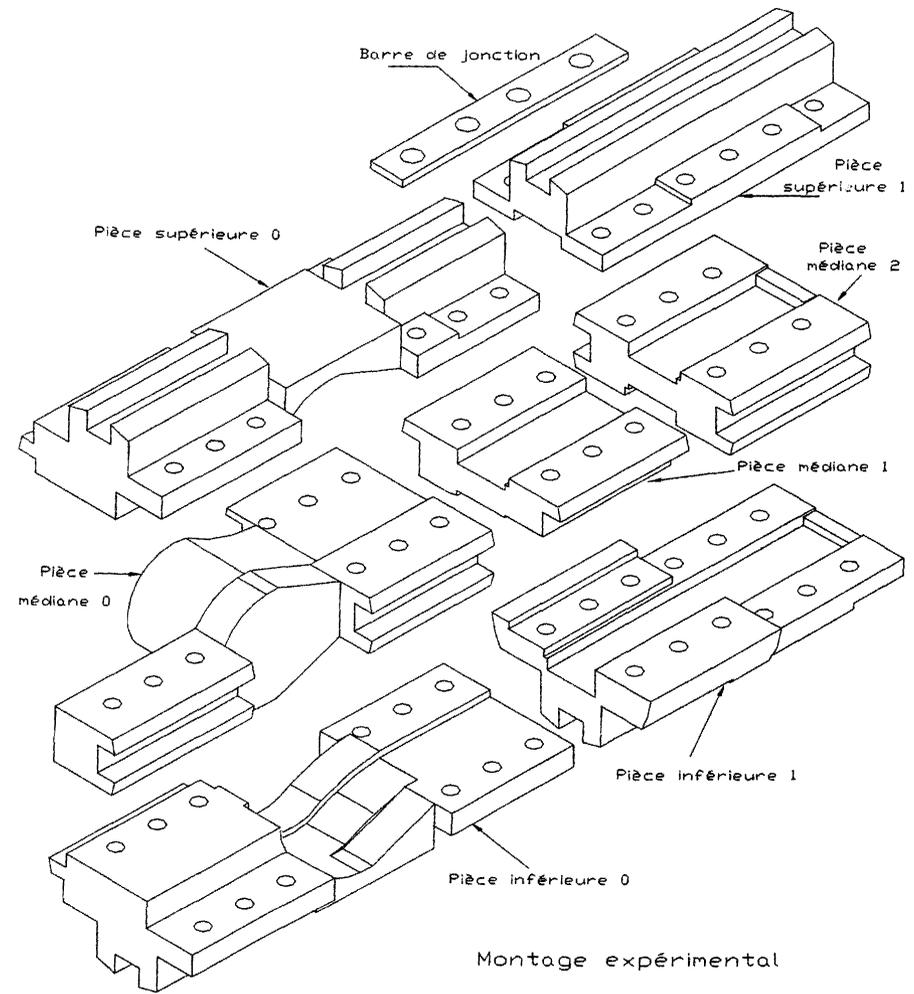
ETAT D'AVANCEMENT

- **Conception (sur Autocad) d'un moule de traitement thermique.**
- **Moule réalisé et réaction de l'échantillon terminée.**



ETAT D'AVANCEMENT

- **Conception (sur Autocad) d'un moule de traitement thermique.**
- **Moule réalisé et réaction de l'échantillon terminée.**
- **Fabrications en cours:**
 - **dispositif de soudage et boites de connexions,**
 - **porte-échantillon en G11.**



ETAT D'AVANCEMENT

- **Conception (sur Autocad) d'un moule de traitement thermique.**
- **Moule réalisé et réaction de l'échantillon terminée.**
- **Fabrications en cours:**
 - **dispositif de soudage et boites de connexions,**
 - **porte-échantillon en G11.**
- **Essais prévus pour le mois de mai.**

RENDEZ-VOUS A MON EXPOSE DU MOIS DE JUIN



FIN