



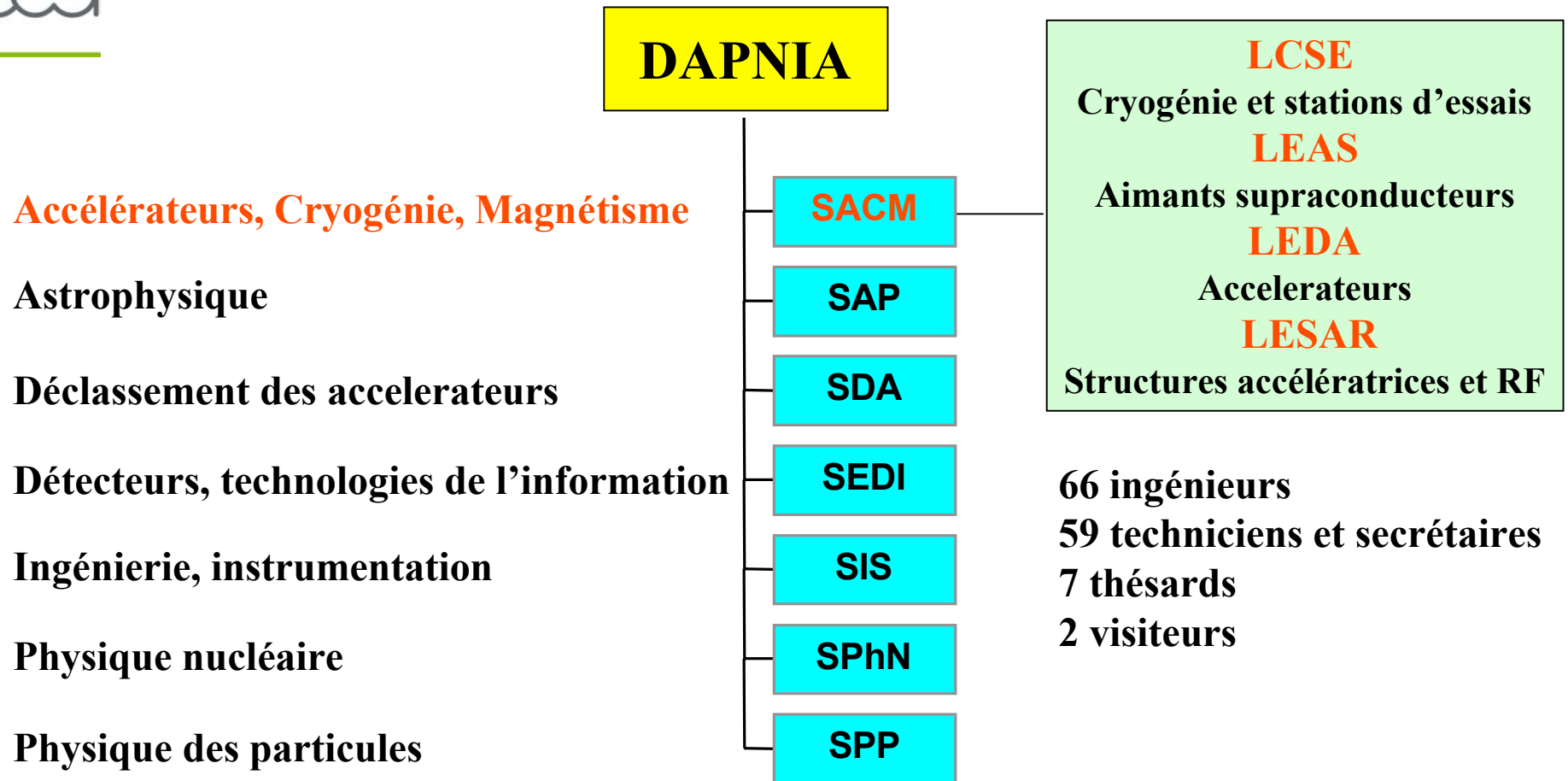
Le Service des Accélérateurs, de la Cryogénie et du Magnétisme

PLAN



- **Introduction**
- **Compétences**
- **Projets en cours**
- **R&D Nb₃Sn**

DAPNIA & SACM



PARTENARIATS



- **Autres départements/directions du CEA**
- **CNRS/IN2P3**
- **Grands laboratoires :**
 - **Physique nucléaire et physique des particules**
 - **Autres domaines : lumière synchrotron, biologie/médecine, fusion ...**
- **Industriels**



– Conception des aimants

- Géométrie des bobines
- Conception du conducteur
- Calculs électromagnétiques, thermiques et mécaniques
- Amenées de courant
- Système de protection en cas de quench
- Chiffrage avant-projets & projets



- **Fabrication d'aimants (prototypes et aimants uniques)**
 - Atelier de bobinage
 - Laboratoire d'imprégnation du conducteur
 - Intégration
 - Suivi technique industriel
- **Tests des bobines ou d'éléments critiques**
 - Tests à température ambiante et à température cryogénique
 - Analyse des tests à chaud et à froid, analyse du quench
 - Mesures magnétiques
- **Grands projets**
 - Conception et réalisation d'outillages de manipulation
 - Procédures de réalisation et transfert technologique
 - Suivi de réalisation dans l'industrie

LCSE: Laboratoire Cryogénie et Stations d'Essais



- Cryogénie de proximité des aimants supraconducteurs
- Stations d'essais et laboratoires
 - **Grandes stations d'essais**
 - **Stations de tests d'échantillons en champ magnétique**
 - **Laboratoire de tests mécaniques et thermiques**
 - **Aimant RMN, $B = 2 \text{ T}$, $L = 2 \text{ m}$, $\varnothing 530 \text{ mm}$**
- **R&D cryogénie**
 - **Thermosiphon**
 - **Transferts thermiques**
 - **Mesures de conductivité thermique**
- **Station de liquéfaction**



- **Conception générale des accélérateurs**
 - Anneaux de stockage
 - Transport au point d'interaction
 - Accélérateurs linéaires d'ions légers supraconducteurs
 - Injecteurs d'électrons
- **Injecteurs de protons de haute intensité**
 - Sources d'ions légers
 - Quadripoles radiofréquences (RFQ)
 - Fiabilité
- **Laboratoire d'« ultra vide »**



- **Conception de structures RF pour les accélérateurs**
 - Cavités (chaudes et supraconductrices)
 - Coupleurs (puissance accélératrice, amortissement des modes supérieurs de résonance)
 - Systèmes de contrôle (analogiques et numériques)
 - Diagnostiques faisceau
 - Sources de puissance
- **R&D hauts gradients**
 - Traitements de surface (polissage chimique, rinçage haute pression)
 - Amélioration des caractéristiques du matériau (Niobium) (traitement thermique, purification)
- **Développement de la technologie associée**
 - Systèmes d'accord à froid sous vide pour les cavités supras
 - Moniteurs d'intensité
 - Fenêtres pour les coupleurs de puissance

Station d'essais W7X



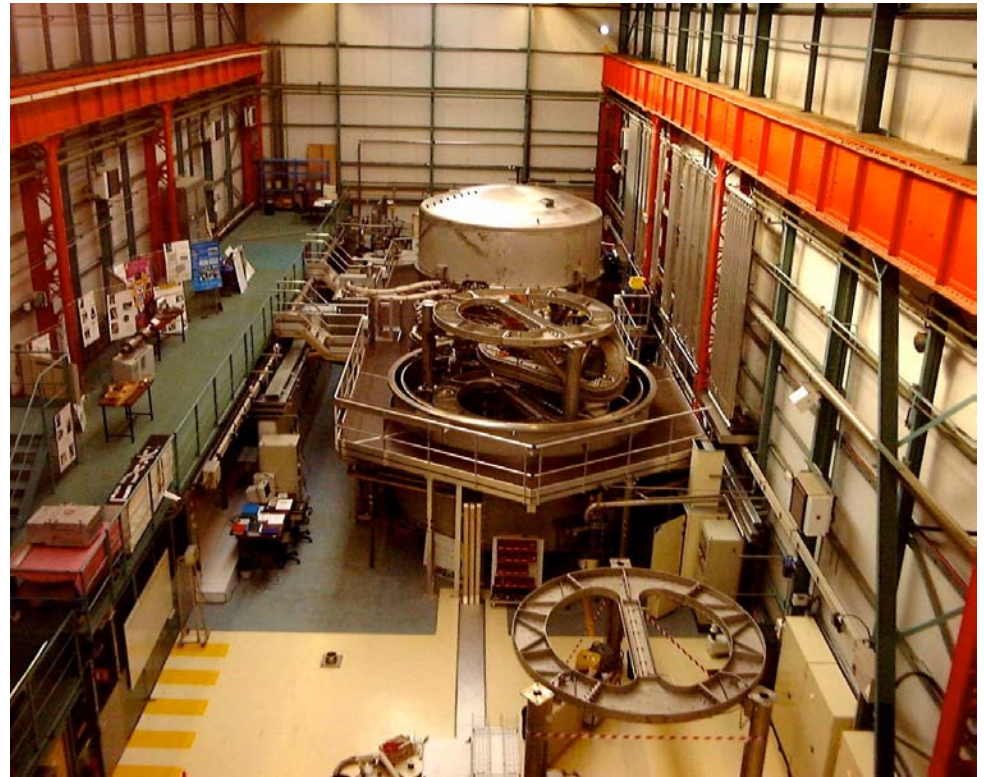
Réfrigérateur hélium

Puissance : 200 W @ 4.2 K

Taille utile des cryostats :

hauteur \approx 4m

diamètre \approx 5 m



- **Paramètres de fonctionnement :**

Hélium supercritique : 4.8 K _ 7.5 K sous 6 bar

Débit maximum : 15 g/s @ 4.2 k

Courant maximum : 25 kA

Station horizontale



Tests de dipôles ou quadripôles supras

- **Caractéristiques :**

$I = 10$ to 20 kA,

Puissance cryogénique :

25 W à 1.8 K et 450 W à 4.2 K.

Dimensions utiles :

$L = 8$ m, $\varnothing = 0.6$ m

Système d'acquisition rapide automatisé

- **Tests récents :**

- Modèle au 1/20 d'un aimant du toroïde Atlas
- Prototype de quadripole LHC
- LHC busbars pour dipôles and quadripôles.

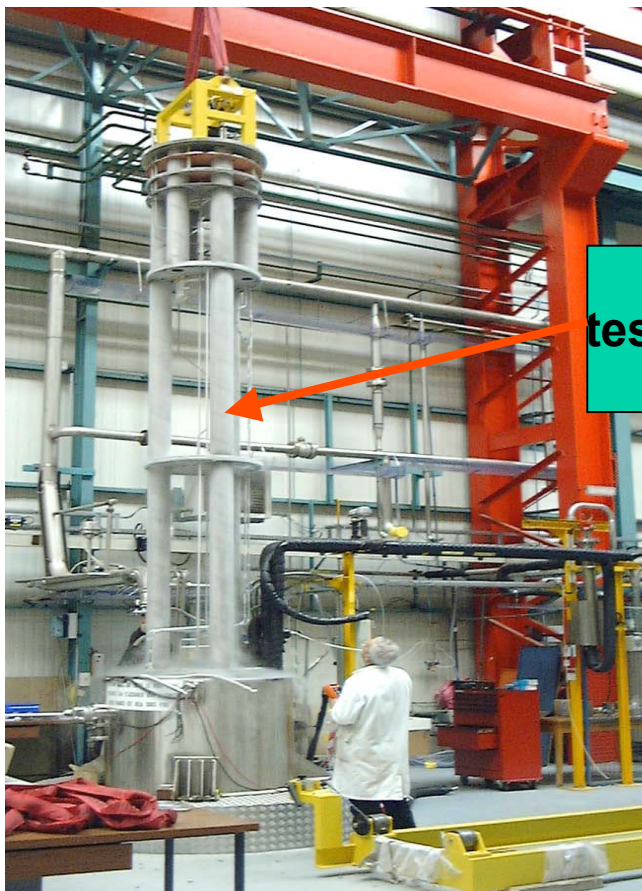


- **Tests prévus :**

- Solénoïde CLAS/DVCS
- Première bobine pour RHIB.
- Quadripole Nb3Sn

GRAND CRYOSTAT VERTICAL

cea



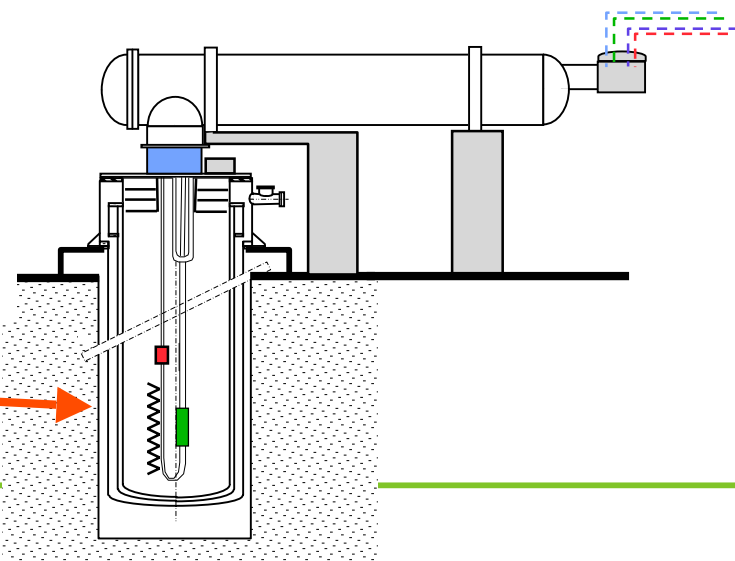
Hauteur : 8m
Ø : 88 cm

CMS : tirants Ta6V
tests mécaniques à froid



CMS : amenées de courant 20 kA

CMS : séparateur de phase &
thermosiphon
(LHe/gHe)



MESURES DE COURANT CRITIQUE EN CHAMP MAGNETIQUE



- **STATION « CHRISTIANE »**

Courant jusque 3000 A

Champ magnétique jusque 7 T

Ø utile 90 mm

Mesures à 4.2 K

- **TESLATRON**

Courant jusque 2000 A

Champ magnétique jusque **17 T** à 2.2 K

Ø utile 49 mm

Température de l'insert variable
de 1.8 K à 200 K

LABORATOIRE de TESTS MECANIQUES



- Presse **150 kN**
- Traction and compression
- 2 cryostats : tests à **77 K** et **4,2 K**:
 - Traction **60 kN**
 - Traction and compression **150 kN**



- Press **300 kN**
- Tests de traction and compression à **300 K**
- Tests de frottements à **300 K** and **77 K**.



PROJETS AIMANTS SUPRACONDUCTEURS



- **Aimants / suivi de réalisation**

- Toroïde ATLAS ■
- Solénoïde CMS ■
- Quadripôles LHC ■
- W7X ■

- **Aimants / réalisation**

- Aimant pour CLAS-DVCS à TJNAF ■

- **Aimants / conception-évaluation**

- NEUROSPIN ■
- Dipôle GLAD de grande ouverture pour GSI ■

Programmes de R&D / aimants supraconducteurs



- **Technologie Nb₃Sn** ■

- Développement du conducteur
- Isolation innovante
- Quadripôle modèle

- **Cryogénie** ■

Conclusion



- **SACM bien reconnu** dans les grands projets d'aimants supraconducteurs NbTi de grande taille ou à haut champ en partenariat avec l'industrie et les grands laboratoires
- **Nécessité d'explorer les nouveaux matériaux supraconducteurs**
- **Modèles d'aimants Nb₃Sn**

- **Perspectives**
- **ITER**
- **Aimants IRM**
- **Futurs accélérateurs/détecteurs de physique des particules ou de physique nucléaire** (extension de GSI Darmstadt, collisionneur e⁺e⁻, montée en luminosité du LHC, super-collisionneur à protons)

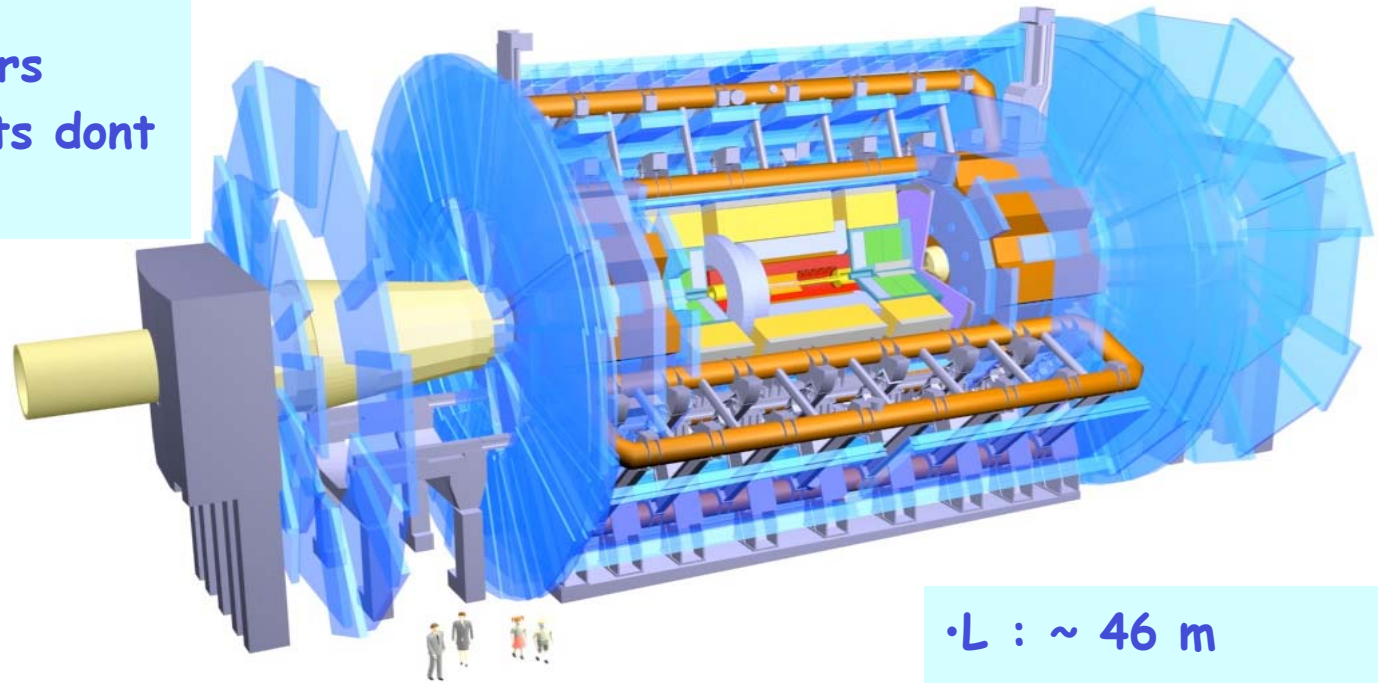
- **Cadre européen 6ème PCRD**



ATLAS : TOROÏDE CENTRAL (1)



ATLAS :
1568 auteurs
149 instituts dont
7 français



• L : ~ 46 m

• Ø : ~ 25 m

• Poids : ~ 7000 t

- CEA/Saclay : maître d'œuvre technique pour le CERN
- Suivi de réalisation et intégration des bobines
- Tests en surface
- Réalisation de l'anneau cryogénique

ATLAS : TOROÏDE CENTRAL (2)

• Caractéristiques



• Dimensions :

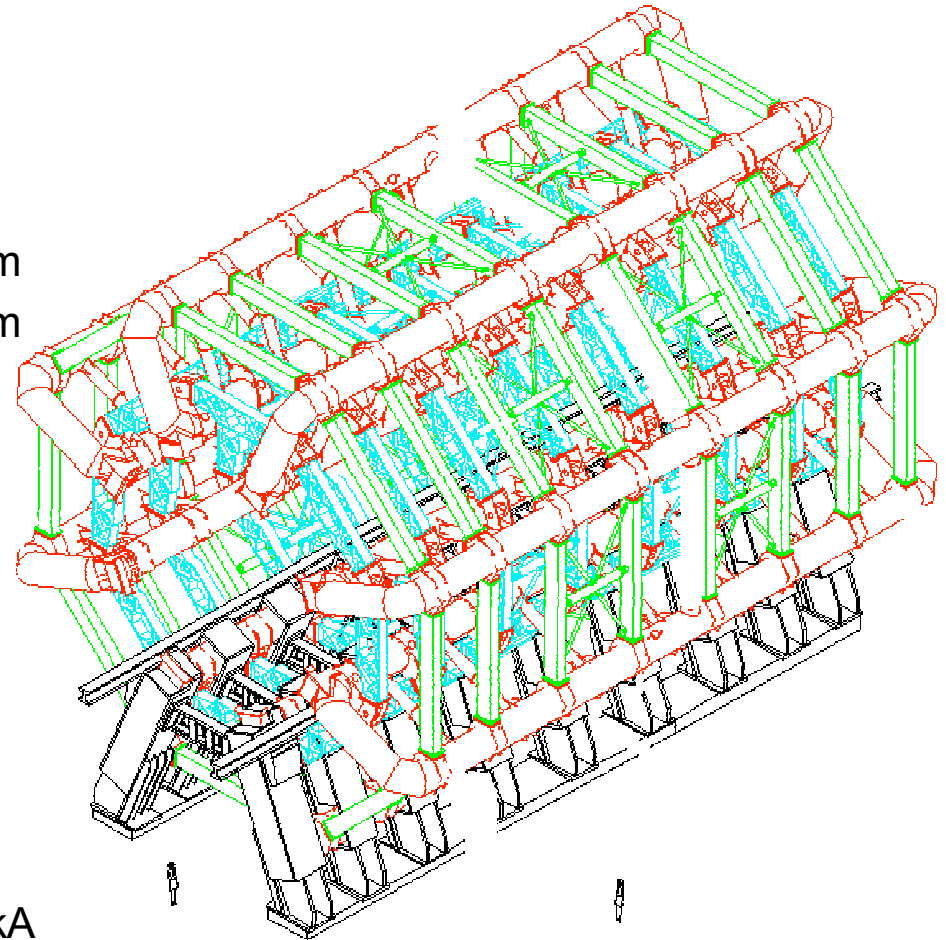
- Largeur interne 9.4 m
- Diamètre externe 20.1 m
- Longueur 25.3 m

• Poids :

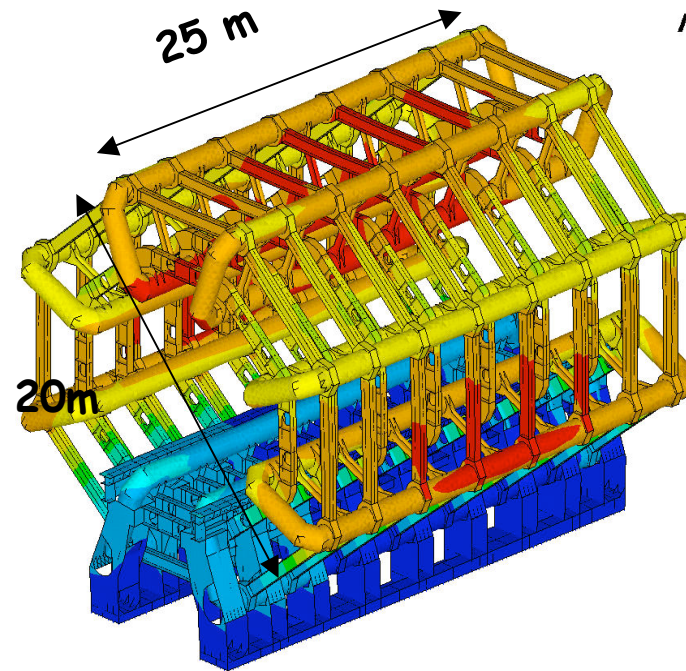
- Masse froide 376 t
- Poids total 832 t

• Bobines :

- Nombre de bobines 8
- Tours/bobine 120
- Courant nominal 20.5 kA
- Energie stockée 1080 MJ
- Champ pic 3.9 T



ATLAS : TOROÏDE CENTRAL (3)



Conception terminée

Fabrication des 3 éléments essentiels terminée :

- bobines supra conductrices (Ansaldo)
- boîtes à bobines (Alstom/ABB)
- cryostat (Zanon)



ATLAS : TOROÏDE CENTRAL- INTEGRATION



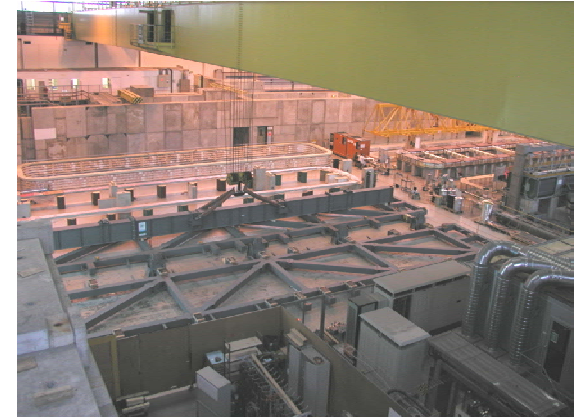
Intégration des bobines dans leur support
mécanique terminée

(intégration 1 au CERN)

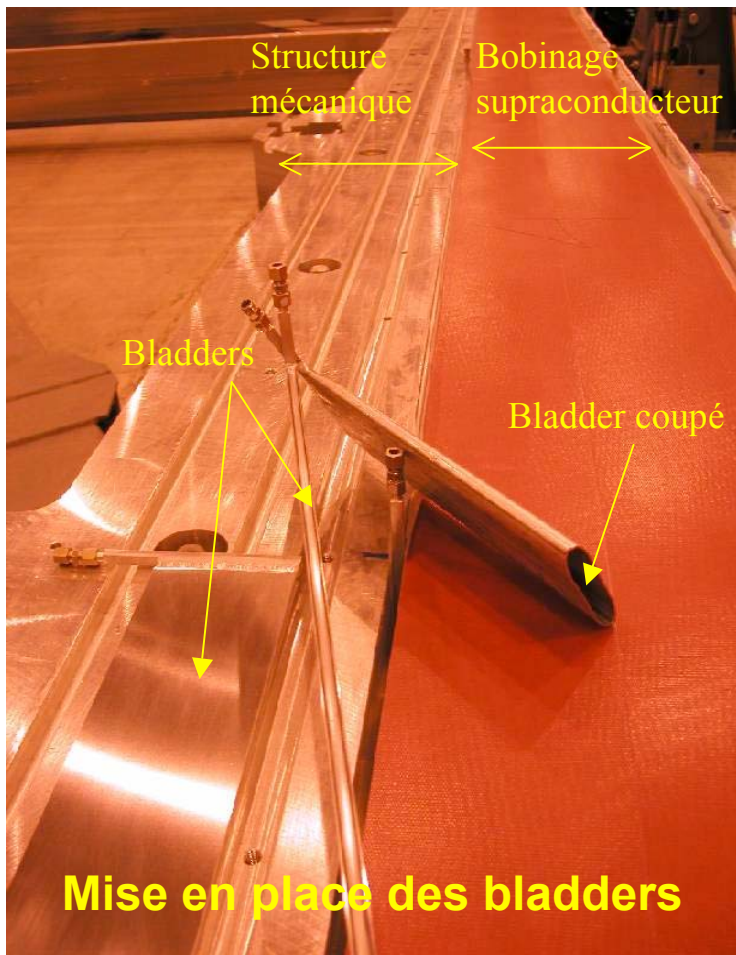
CERN-DAPNIA-DUBNA-TECHNICATOME

Cryostating de la première masse froide en cours

(intégration 2)



Intégration d'ATLAS: R&D et B0.



R&D (1996): nécessité de précontraindre les bobinages supraconducteurs dans leur support mécanique.

Développement d'une technologie dédiée:

- Câble expansible (bladder) en aluminium.
- Remplissage de microbilles de verre et résine époxy successivement.
- Mise en pression sous 120 bars.
- Polymérisation sous pression à 120C.



Réalisation de l'aimant prototype B0 à Saclay en 2000.

Tests au cern en 2001 jusqu'à un courant maximum de **24kA** (nominal 20.5kA).

Intégration d'ATLAS: BT 1 à 8.



Intégration 1: retournement d'un aimant.

1ere polymérisation: 7 janvier 2003.
8ème polymérisation: 6 octobre 2003.

847 bladders gonflés et polymérisés sous 120 bars.
1 bladder a fuit à 80 bars.

DSM/DAPNIA/SACM – Pascal DEBU

Réalisation au CERN.

4 contrats:

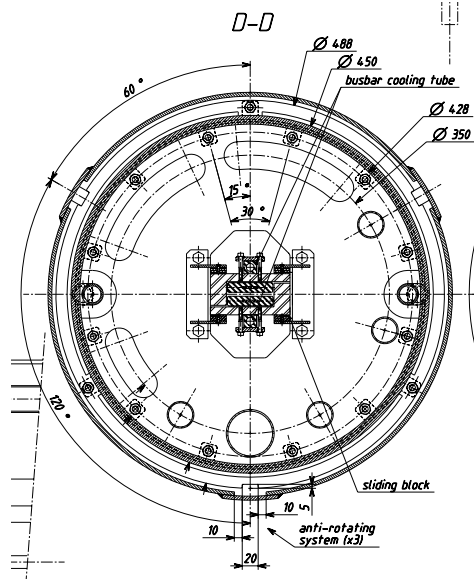
- Balcke Duerr Gmbh (D): réalisation des bladders.
- Cosmi (I): réalisation des outillages de manutention.
- JINR (Ru): mise à disposition du personnel.
- Technicatome (F): supervision et AQ du chantier.



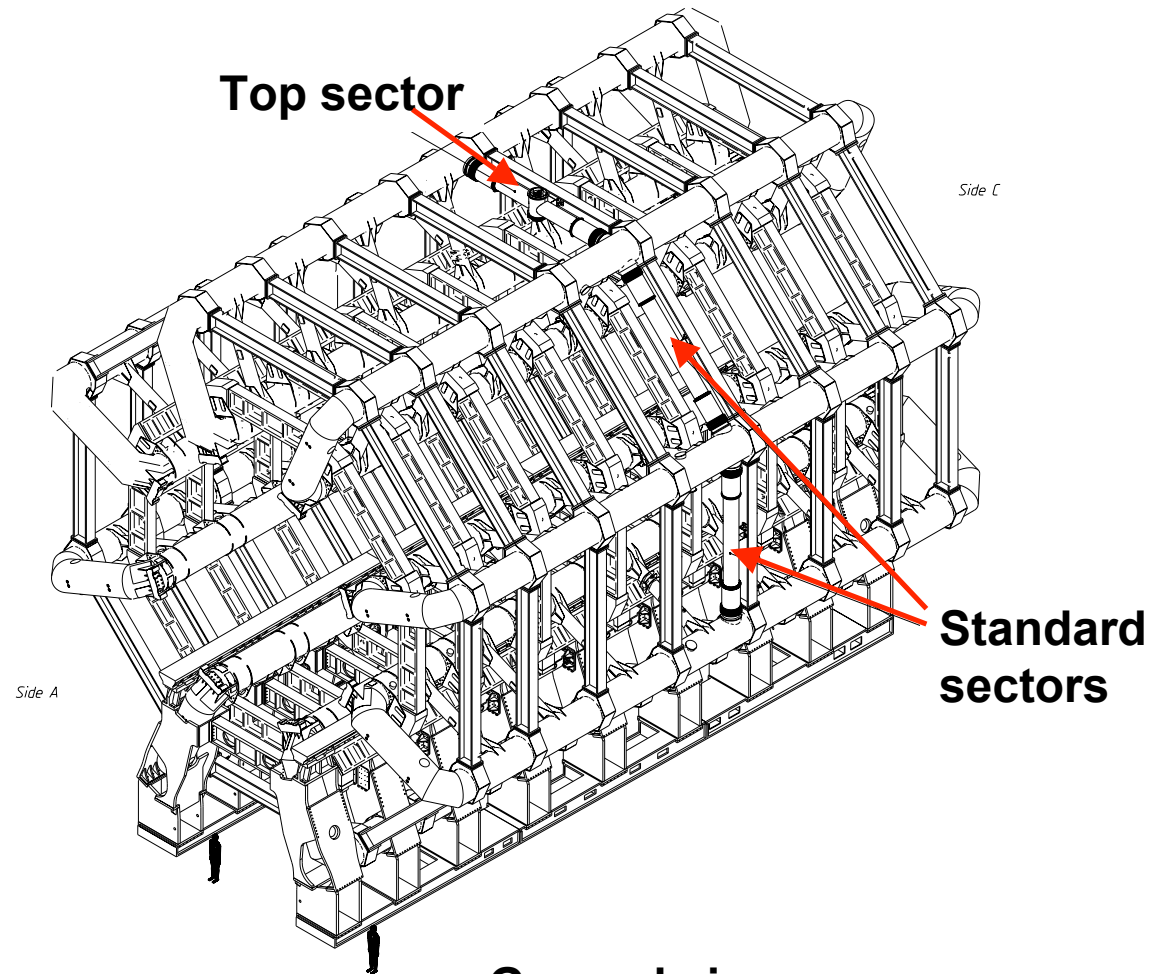
Intégration 1: mise en place de la polymérisation.

ATLAS : ANNEAU CRYOGENIQUE

- 8 sectors (3 types) :
- 6 standards
 - 1 top
 - 1 bottom



Typical cross section



General view



CMS Collaboration



36 Nations, 159 Institutions, 1940 Scientists (February 2003)

TRIGGER & DATA ACQUISITION

Austria, Finland, France, Greece, Hungary, Italy, Korea, Poland, Portugal, Switzerland, UK, USA

TRACKER

Austria, Belgium, Finland, France, Germany, Italy, Japan*, New Zealand, Switzerland, UK, USA

CRYSTAL ECAL

Belarus, China, Croatia, Cyprus, France, Italy, Japan*, Portugal, Russia, Serbia, Switzerland, UK, USA

PRESHOWER

Armenia, Belarus, Greece, India, Russia, Taipei, Uzbekistan

RETURN YOKE

Barrel: Czech Rep., Estonia, Germany, Greece, Russia
Endcap: Japan*, USA, Brazil

SUPERCONDUCTING MAGNET

All countries in CMS contribute to Magnet financing in particular:
Finland, France, Italy, Japan*, Korea, Switzerland, USA

FEET
Pakistan
China

FORWARD CALORIMETER

Hungary, Iran, Russia, Turkey, USA

HCAL

Barrel: Bulgaria, India, Spain*, USA
Endcap: Belarus, Bulgaria, Russia, Ukraine
HO: India

MUON CHAMBERS

Barrel: Austria, Bulgaria, China, Germany, Hungary, Italy, Spain,
Endcap: Belarus, Bulgaria, China, Korea, Pakistan, Russia, USA

* Only through industrial contracts

Total weight : 12500 T
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 21.5 m
Magnetic field : 4 Tesla

SOLENOÏDE CMS

Conception générale

Études détaillées et tests de composants critiques

(tirants, écrans thermiques, cryogénie de proximité, amenées de courant)

Coordination de l'assemblage

Contribution aux études du conducteur et au bobinage



CMS Solenoid Insertion Tests 13 06 02 K 9000 001

Bobinage : Ansaldo

Ecrans thermiques : Cryotec

Amenées de courant : SDMS

Enceinte à vide : DWE

Tirants : Lutch

Montage de la masse froide :

Dapnia+ Ansaldo+Cryotec+SDMS

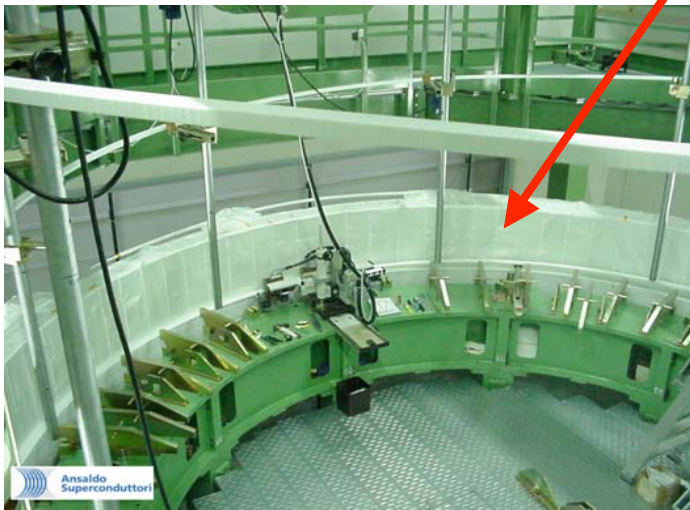
Solenóide CMS : réalisation des 5 modules



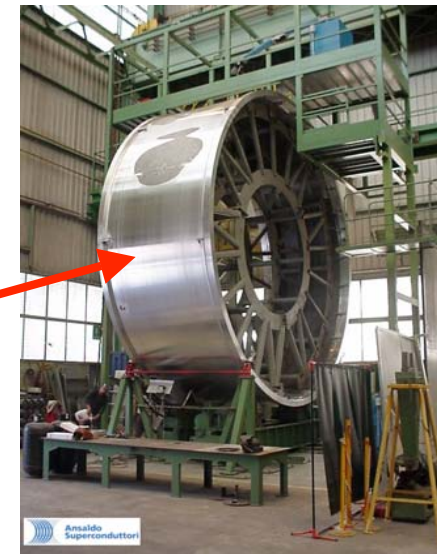
CB-2
95%



CB-1
69%



CB0
46%



CB+1
18%

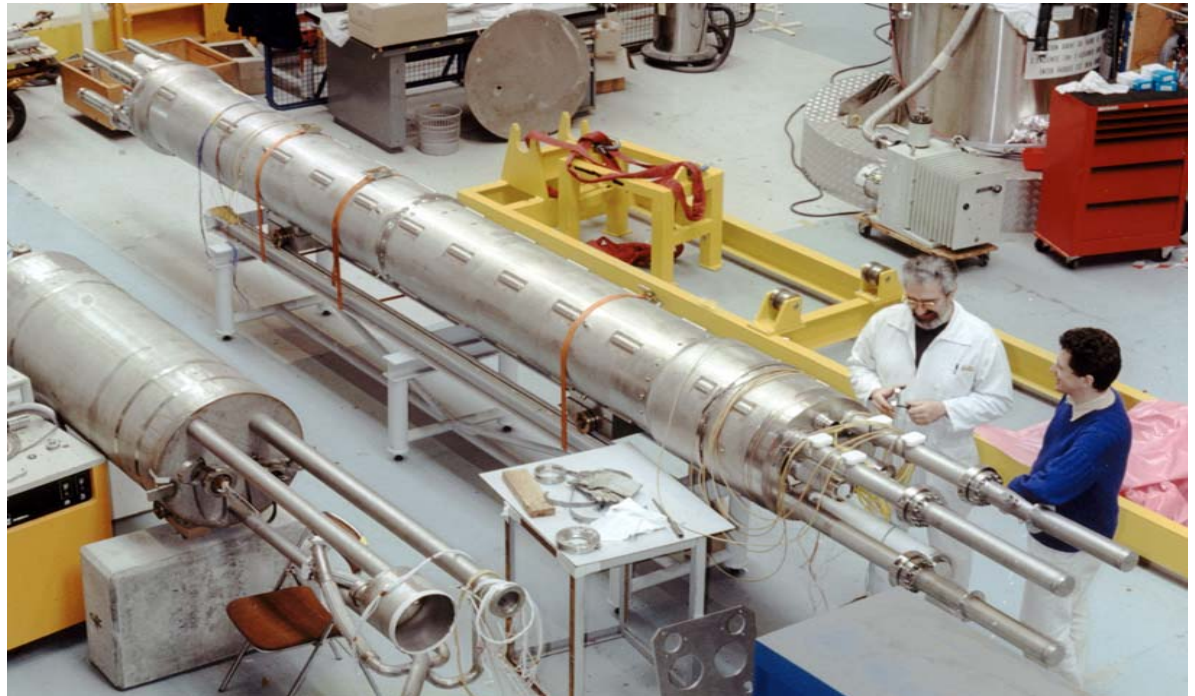


QUADRIPOLES LHC

Accord N° 1 CERN/CEA/CNRS pour la construction du LHC



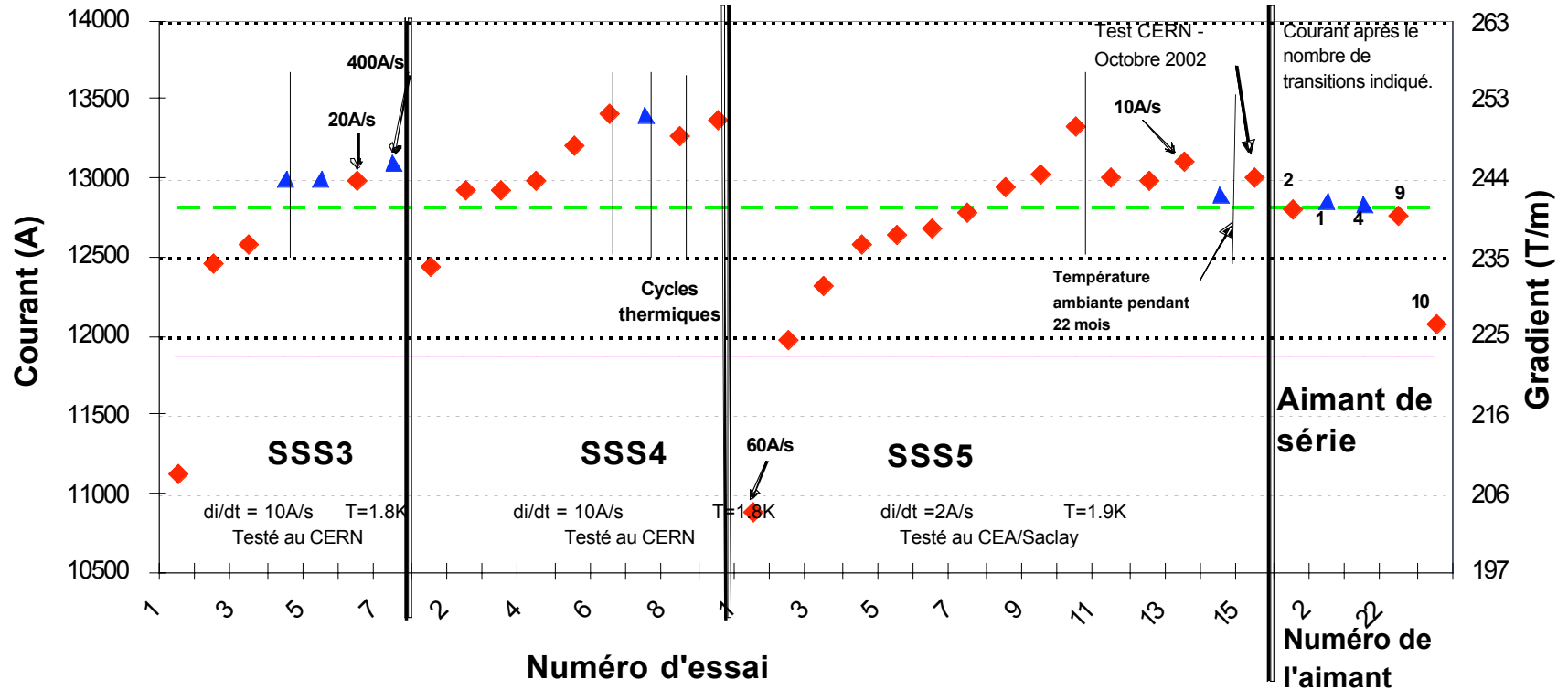
- Étude des masses froides des sections droites
- Prototypes
- Transfert à l'industrie (ACCEL) et suivi de réalisation chez l'industriel
- Cryostating au CERN



3 prototypes faits à Saclay

Quadripôles LHC: historique

Historique des transitions



État d'avancement :

50 aimants réalisés par ACCEL (sur 400)

5 aimants ont passé les tests au CERN, 4 avec succès

1^{ère} masse froide en cours de test



SOLENOÏDE CLAS-DVCS



Physique :

“Deeply Virtual Compton Scattering”
expérience à TJNAF (juin 2004).

Objectif projet :

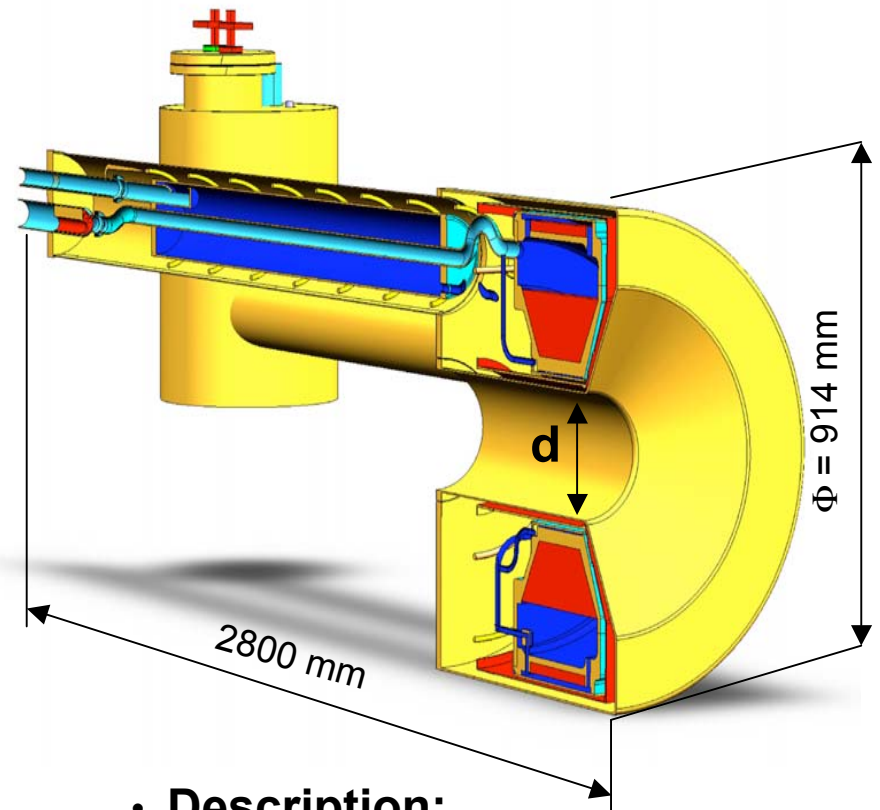
Accroissement de l'acceptance du
spectromètre CLAS (*Cebaf Large
Acceptance Spectrometer*)

Etat d'avancement

(automne 2003) :

- Bobinage terminé
- Mesures magnétiques en
préparation
- tests début 2004.

SACM responsable projet

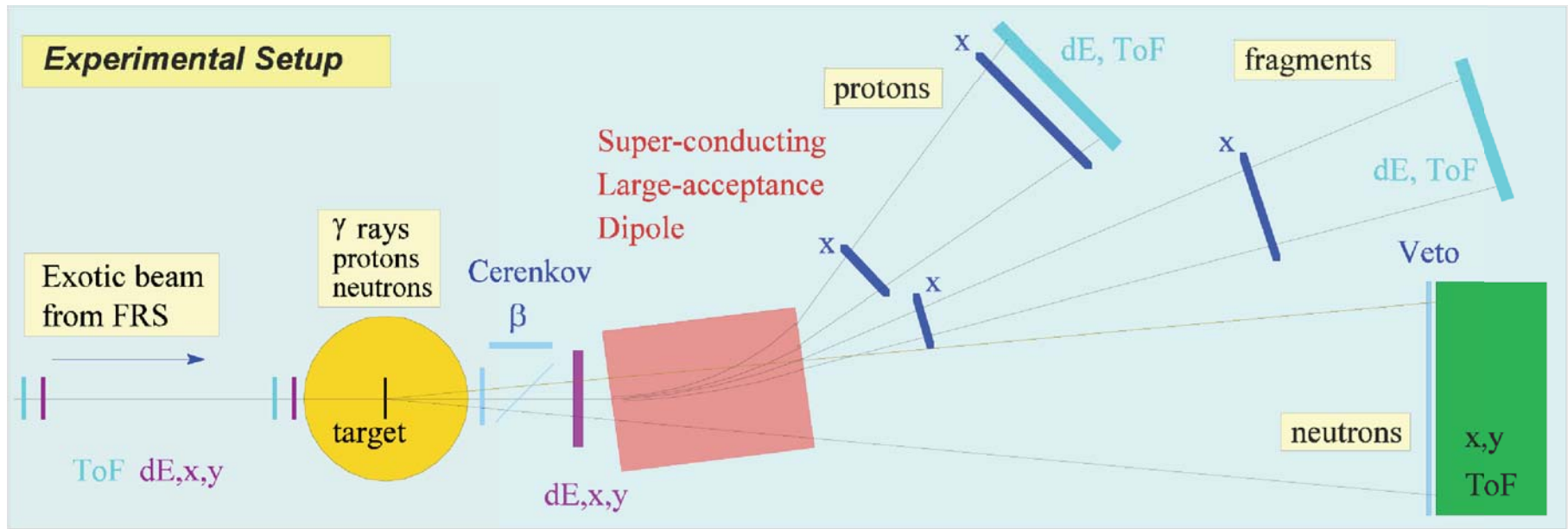


• Description:

Conception originale : deuxième bobine
comme écran magnétique
Champ de 4.5 Tesla (560 A) sur l'axe et
moins de 0.003 Tesla à l'extérieur du
cryostat
Diamètre utile $d = 230$ mm.

RHIB-GLAD

- « Reactions with Heavy Ions and exotic nuclei Beams »
- « GSI Large Acceptance Dipole magnet »
- Collaboration européenne de 14 instituts de 9 pays
- Installation : 2007



Distance cible-détecteur de neutron ~ 12 m

Caractéristiques de l'aimant GLAD



Intégrale de champ ~ 4.8 Tm

Grande ouverture angulaire +/- 80 mrad (horizontale & verticale)
distance de la cible ~ 1,2 m

Ouverture : 1,20 x 0,60 m en aval

Champ de fuite : moins de 20 mT à 30 cm de l'entrée

Dipole NbTi supraconducteur

Ecran actif :

racetrack coils - variable trapezoids

Rigidité mécanique :

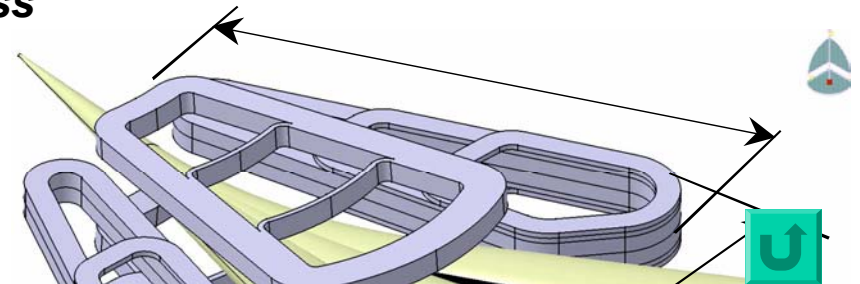
Al alloy massive cold coil box + prestress

Refroidissement indirect :

LHe thermosiphon

Protection :

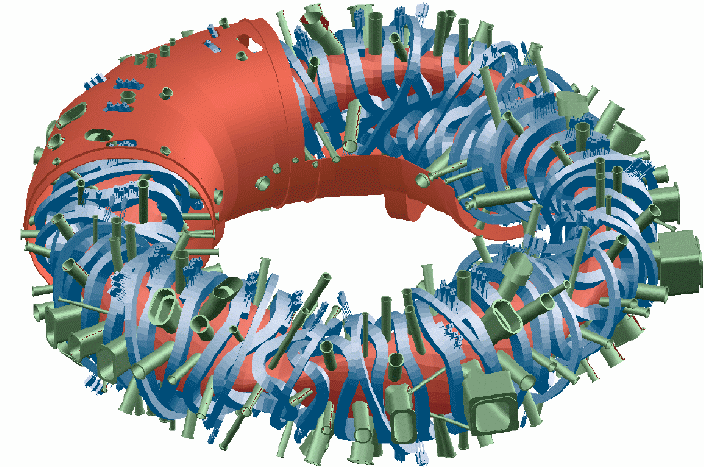
quench detection & external discharge



W7X



- **W7X : stellarator Wendelstein**
- **Programme européen de fusion**
- **Responsabilité du projet :
IPP Garching - Greifswald Max
Planck Institut**



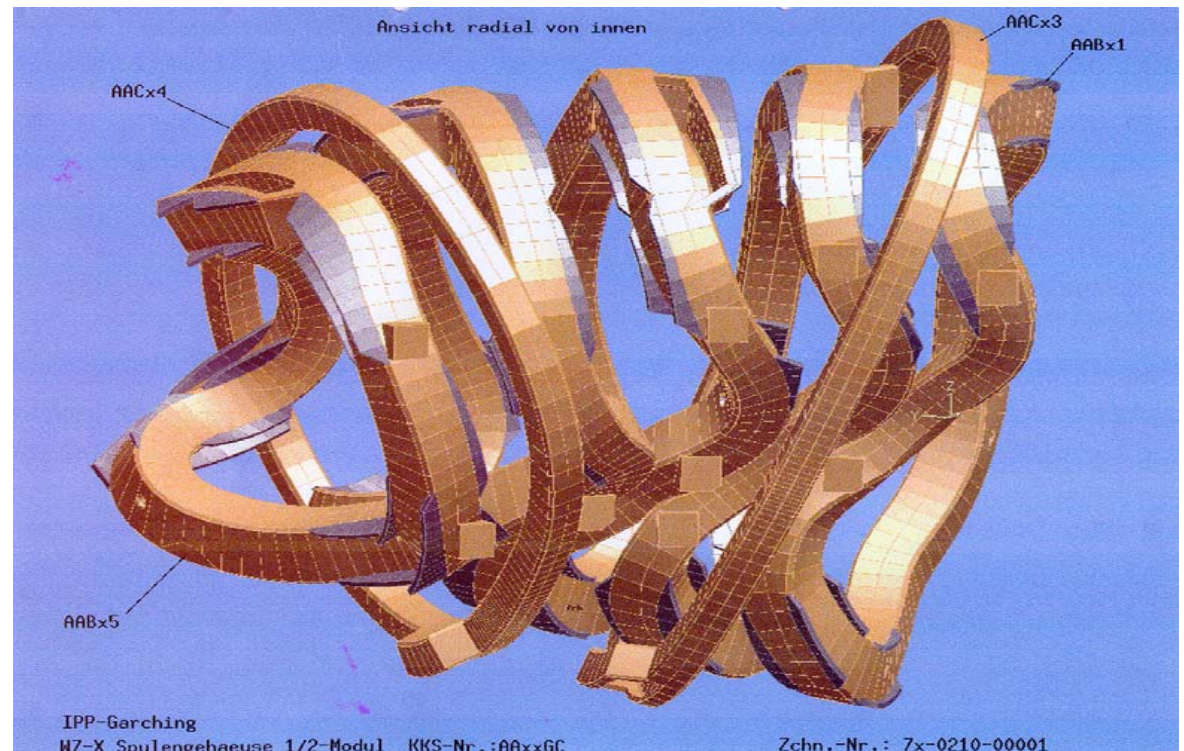
- **Bobines supraconductrices construites en Allemagne (Noehl), Italie (Ansaldo) et Royaume-Uni (Tesla)**
- **Rôle du CEA : réception des bobines**

Tests des bobines W7X

- Isolation à température ambiante : 1600 V AC , 2kHz
- A chaud et à froid, tenue du diélectrique à 9.1 kV
- A chaud et à froid, contrôle de la perte de charge hélium
- Test au courant nominal (≈ 16 kA) et à la température (5.7 K) critique moins 0.2 K
- Test de la transition pour la première bobine de chaque type



demi module



NEUROSPIN

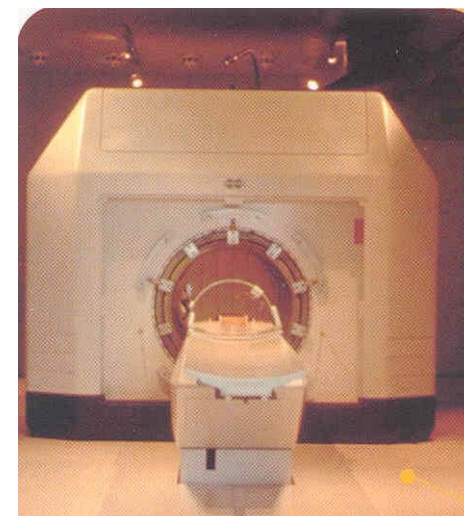


- **Création d'un centre de neuro-imagerie de pointe à St Aubin par CEA/DSV**
 - Repousser les limites de l'imagerie RMN
 - Étude du fonctionnement du cerveau
 - Compréhension de certaines maladies



- **Centre équipé de 4 machines :**

- Machine classique 3 T « homme »
- Machine très haut champ 17 T « petit animal »
- Machine haut champ 11.74 T « pré clinique »
- Machine haut champ 11.74 T « homme »



NeuroSpin: contribution DAPNIA



Chef du projet au DAPNIA

Préétude aimant 11,7 T, Ø 1m

- Supraconducteur très proche de la transition (même à 1.8K)
Protection, homogénéité, mécanique, écrantage ...

Préétude bobines de gradient

- Montée de courant très rapide (ms)
Problèmes mécaniques et acoustiques
(brevet déposé)

Étude refroidissement hélium

Étude de l'effet potentiel de la RF sur les tissus

Étude théorique et expérimentale de l'antenne RF

- Modélisation, réalisation et tests d'un prototype

NeuroSpin: calendrier

- **Bâtiments : Concours d'architecte clos ; livraison mars 2006**



- **Machines RMN**
 - 3T : mars 2006
 - 17 T : 2ème semestre 2006
 - 1er 11.74 T : 4ème trimestre 2006
 - Appel Public à concurrence pour étude de faisabilité lancé
 - Étude de faisabilité décembre 2003 à avril 2004
 - » Étude et réalisation juillet 2004 à décembre 2006



R&D Nb₃Sn : limites du NbTi

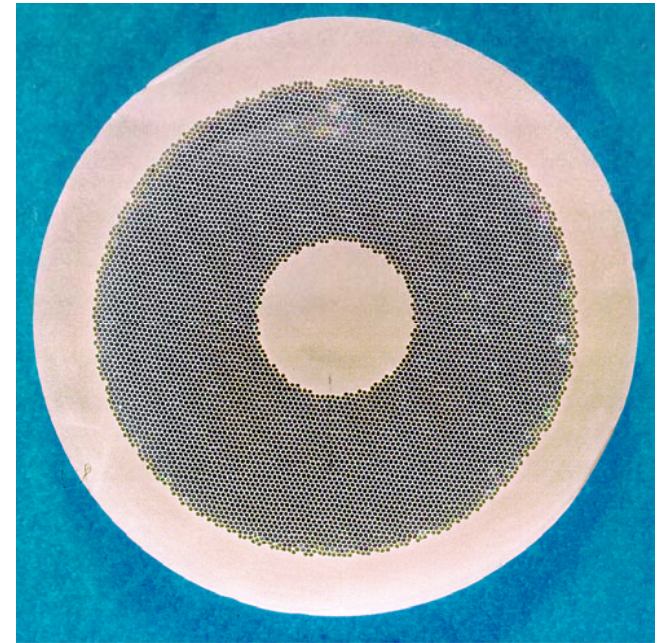


- Les études de R&D menées dans le cadre du LHC ont permis de mettre au point la technologie des aimants nécessaires à la machine, mais ont clairement démontré que **la limite en champ des aimants à base de conducteurs NbTi (refroidis à 1,8 K) se situait autour de 10T.**

- **Pour aller au delà**, il est donc indispensable de changer de matériau supraconducteur.

- **Applications :**
 - bobines ITER,
 - aimants pour les futurs accélérateurs haute énergie et/ou haute luminosité (dipôles et quadripôles),
 - aimants RMN à très haut champ

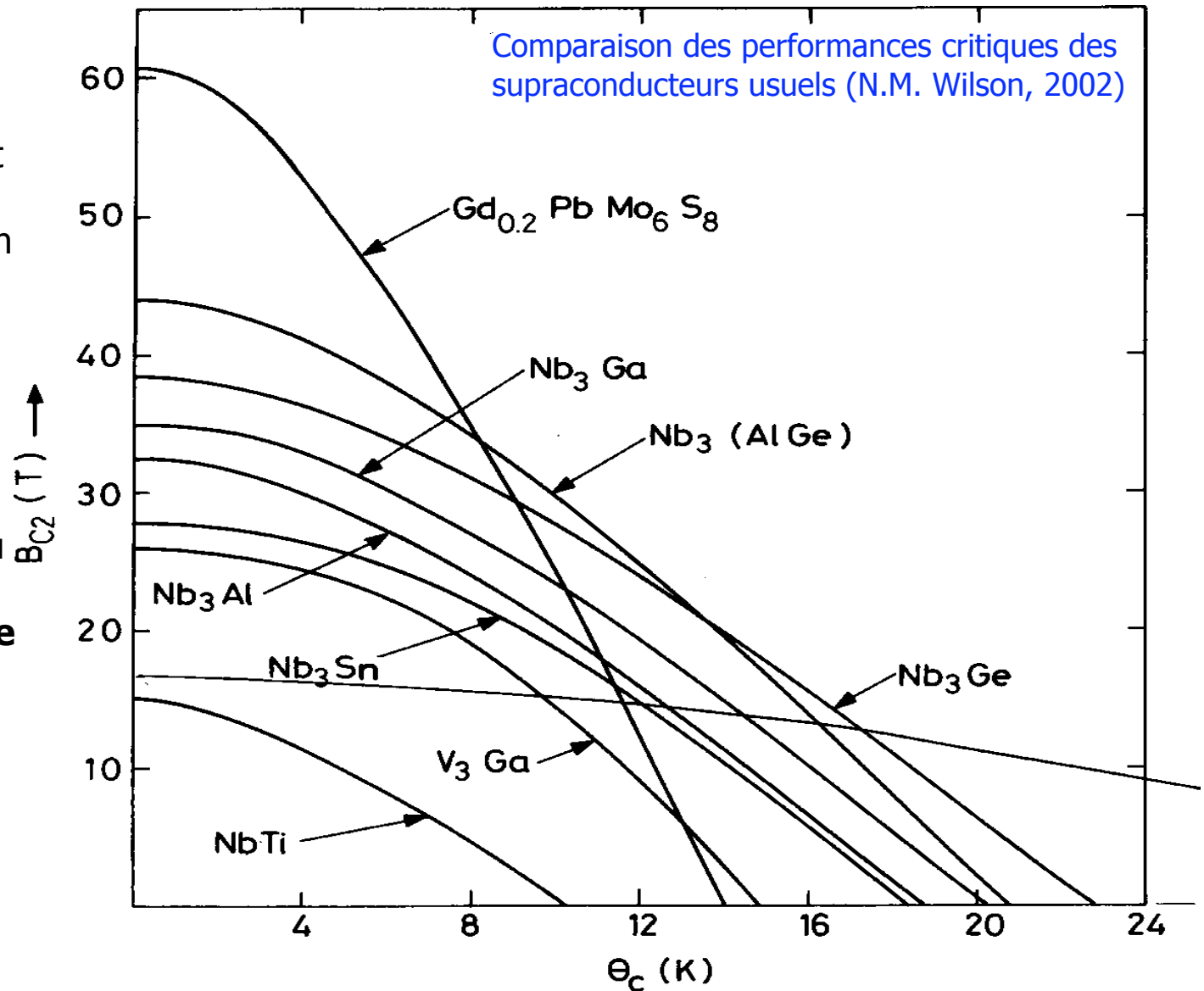
...



Exemple de fil composite multifilamentaire Cu/NbTi fabriqué par Alstom/MSA (Alstom/MSA est l'un des Leaders mondiaux dans la production de ce type de fils grâce à un contrat couvrant ~50% des besoins du LHC).

Au Delà du NbTi: le Nb₃Sn

- Un matériau disponible industriellement pour des applications réclamant de fortes densités de courant critique dans des champs magnétiques élevés est un composé intermétallique polycristallin de formule Nb₃Sn.
- La température et le champ critique du Nb₃Sn sont à peu près deux fois plus élevés par rapport au NbTi, mais il a un inconvénient majeur : **une fois formé, il devient cassant et ses propriétés sont sensibles au taux de déformation.**



QUADRIPÔLE Nb₃Sn

- **Collaboration Dapnia - Alstom/MSA**

(dont une thèse cofinancée en cours)



- **Objectifs :**

- développement de fils Nb₃Sn à forte densité de courant critique afin de rester compétitif au niveau mondial
- Acquisition de la technologie de mise en œuvre du Nb₃Sn

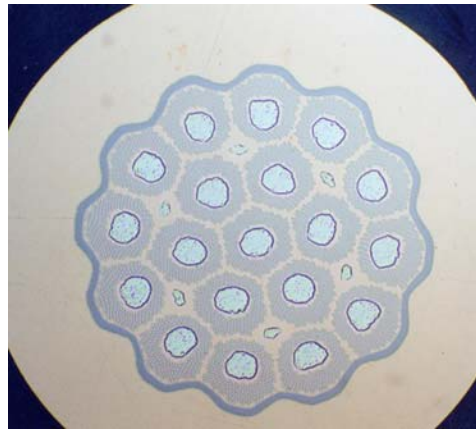
- **Caractéristiques :**

- $G = 211 \text{ T/m @ } 11\,870 \text{ A}$, ouverture de 56 mm (\approx QLHC)
- Avancement : plans de détail réalisés à 60 %, 50 % des commandes engagées, démarrage bobinage prévu fin 2003, quadripôle fabriqué début 2005

Quadripôle Nb₃Sn: activités Alstom/MSA



- Alstom/MSA a complété en 1999 la première phase de la collaboration en produisant un fil Nb₃Sn répondant à des spécifications inspirées de celles pour les bobines modèles d'ITER (non-Cu J_C de 750 A/mm² à 4,2 K et 12 T).
- Alstom/MSA a lancé les commandes de matériaux pour la deuxième phase de la collaboration dont l'objectif est le développement d'un fil Nb₃Sn performant (non-Cu J_C de 2000 A/mm² à 4,2 K et 12 T).



Fil Nb₃Sn développé par Alstom/MSA
(non-Cu J_C de 750 A/mm² à 4,2 K et 12 T)

ISOLATION CERAMIQUE

• Contexte :

Le Nb₃Sn est le meilleur candidat actuel sur le marché pour réaliser des aimants à très haut champ, mais il est difficile à mettre en œuvre :

- Traitement thermique à 660°C pendant 2 semaines sous gaz neutre
- Matériau très fragile après réaction

• Objectifs :

Développer un gainage céramique pour câbles supraconducteurs et notamment supprimer l'imprégnation sous vide.

• Partenariat :

Accord de collaboration avec l'IEM de Montpellier et le DAM/LCCA
Thèse en cours cofinancée CEA-Région Languedoc-Roussillon

• Avancement :

Deux brevets déposés (juillet 2001, mai 2003) sur le précurseur et le procédé

Propriétés diélectriques satisfaisantes

Tenue mécanique, homogénéité et stabilité du dépôt en cours d'évaluation



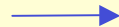
ISOLATION CERAMIQUE : principe



•Isolation « classique »



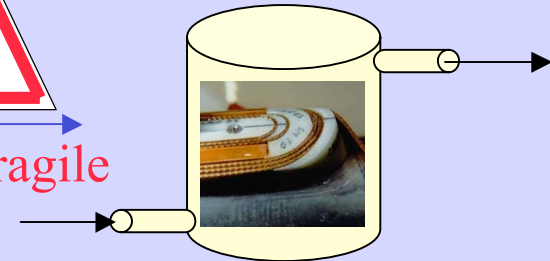
Guipage
Bobinage



Traitement
thermique

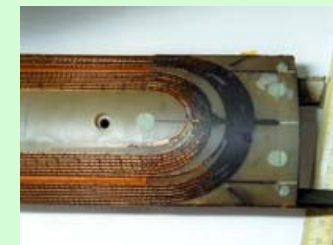
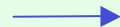
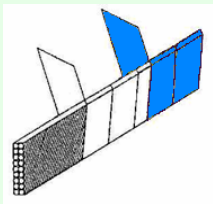


Très fragile



Imprégnation

•Isolation « céramique »





Two-phase He I thermosiphon flow

Heat and mass transfer, Δp and CHF measurement

Void fraction meter development

Optical cell development (flow patterns)

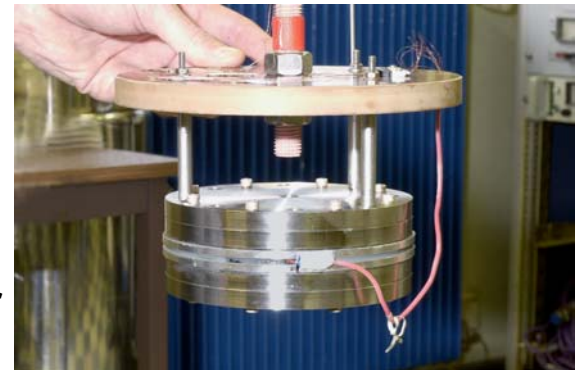


He II heat transfer

Heat transfer through porous media (insulation)

Kapitza and thermal conductivity measurement

Analytical approximate solution for transient heat transfer



Chauffeur Capteurs de température Tête froide échantillon

Thermal conductivity measurement

Integral and differential determination method

Measurement on insulators and conductors from 2 K up to 300 K.

