

**CARACTERISATION ET MODELISATION MULTI-EHELLES DU
COMPORTEMENT THERMOMECHANIQUE D'UN CABLE COMPOSITE
SUPRACONDUCTEUR.**

**CHARACTERISATION AND MULTI-SCALES MODELISATION OF THE
THERMOMECHANICAL BEHAVIOUR OF A SUPERCONDUCTING
COMPOSITE CABLE.**

C. Gourdin, M. Reytier, P. Védrine

Commissariat à l'Energie Atomique / Saclay
DSM/DAPNIA/STCM
F-91 191 Gif sur Yvette, France
e-mail : gourdin@dapnia.cea.fr

RESUME

La connaissance et la prévision des caractéristiques mécaniques des câbles supraconducteurs (NbTi et Nb₃Sn) utilisés dans les aimants du Service des Techniques de Cryogénie et de Magnétisme devient un véritable enjeu.

En effet, la phase de conception d'aimants supraconducteurs nécessite d'effectuer des calculs de dimensionnement de plus en plus précis, les forces de Lorentz devenant considérables. Cela repose sur une bonne connaissance du comportement mécanique de chaque constituant. Mais les câbles présentent, en compression, un comportement non linéaire et hystérétique qui rapidement devra être pris en compte. C'est pourquoi, un travail de R&D est initié aujourd'hui en vue de comprendre et de formuler ce comportement particulier.

Cet article présente la structure des câbles supraconducteurs de nos applications ainsi que leur procédé de fabrication. Puis, nous faisons une brève description des moyens et de la procédure expérimentale utilisés pour la caractérisation de leur comportement mécanique en compression. Enfin, les principaux résultats obtenus à température ambiante ainsi qu'à température cryogénique dans l'hélium liquide à 4.2K sont discutés.

ABSTRACT

The prediction of the superconducting cable mechanical properties (NbTi and Nb₃Sn) becomes a great stake for the STCM applications.

During the design phase of our magnets, the electromagnetic forces become considerable. Therefore, the control and the accuracy of the structural calculations need well known mechanical properties for each component. But, superconducting cables present, in compression, a non linear mechanical behaviour with a significant hysteresis, which will have to be taken into account in a near future. That is why a study is started in order to understand and to formulate this particular mechanical behaviour.

In this paper, the NbTi and Nb₃Sn cable structure is first presented as well as their manufacturing process. Then, a description of the experimental procedure used to realise the compression tests is made. Finally, the main results obtained at room temperature and also in liquid helium at 4.2K are discussed.

**MOTS CLES : COMPORTEMENT, TEMPERATURE CRYOGENIQUE, CABLES
KEYWORDS : BEHAVIOUR, CRYOGENIC TEMPERATURE, CABLES**

INTRODUCTION

Le service des Techniques de Cryogénie et de Magnétisme (STCM) du CEA Saclay est chargé de l'étude, de la réalisation et des tests d'aimants supraconducteurs ainsi que de leur cryogénie associée, essentiellement pour les grands appareils de physique. Les technologies mises en œuvre dans les nouveaux aimants supraconducteurs permettent de générer des champs magnétiques de plus en plus importants. Les contraintes mécaniques résultant des efforts électromagnétiques deviennent alors de plus en plus élevées. De ce fait, la phase de conception de ces aimants nécessite des calculs de dimensionnement de plus en plus précis. Dans ce cadre, l'utilisation de comportements linéaires pour les différents constituants des aimants peut ne plus suffire et d'autres modélisations doivent être envisagées (Reytier et al. 00).

Aujourd'hui, une attention particulière doit être portée sur la modélisation du câble supraconducteur. Ce composant, fortement hétérogène, a un comportement mécanique, en compression, non linéaire avec une forte hystérésis. Un travail de R&D est initié en vue de mieux comprendre les mécanismes mis en jeu et de formuler ce comportement. Pour cela, les mesures des caractéristiques mécaniques sur des échantillons représentatifs de bobinage d'aimants supraconducteurs ont commencé. Ils seront nécessaires pour l'identification des lois de comportement à partir d'essais mécaniques adéquats (Védrine et al. 98). Par la suite, une implantation du modèle de comportement dans le logiciel par éléments finis CASTEM2000 (Fichoux, 98) sera effectuée.

A l'heure actuelle, le STCM est engagé dans la réalisation d'aimants supraconducteurs, en collaboration avec le CERN, pour le futur accélérateur de particules : le LHC (Large Hadron Collider). Les principaux aimants à la charge du STCM sont les aimants de détecteurs CMS, ATLAS et les aimants quadripolaires de l'accélérateur.

Deux matériaux supraconducteurs sont utilisés pour la fabrication du câble composite : l'alliage NbTi et le composé Nb₃Sn. Les aimants quadripolaires développés pour le LHC sont en NbTi. Un prototype d'aimant quadripolaire en Nb₃Sn est en cours de développement au STCM (Gourdin et al. 00).

Les aimants quadripolaires possèdent une structure dite 2 en 1 (pour les aimants de l'accélérateur LHC), c'est à dire qu'ils sont traversés par deux canaux où circulent en sens inverse les faisceaux de particules (cf. Figure 1). Un premier ensemble appelé "masse froide" contient les parties magnétiques. Cette masse froide est ensuite introduite dans un cryostat qui la maintient à la température de fonctionnement (1,9 K). L'ensemble masse froide/cryostat constitue un aimant de type quadripolaire. La masse froide est la partie active de l'aimant. Elle est constituée de 8 bobines, 4 par canal, de diamètre intérieur 56 mm et de diamètre extérieur 105,7 mm. Ces bobines sont assemblées 4 par 4 et sont maintenues sous pression par des colliers.

Ces deux ensembles bobines/colliers sont placés dans le circuit magnétique, constitué d'empilements de laminés prédécoupés en acier bas carbone de 5 mm d'épaisseur. L'espace entre le circuit magnétique et les colliers sert à encaisser la différence de contraction thermique du fer et de l'acier inoxydable pendant le refroidissement de la température ambiante jusqu'à celle de l'hélium superfluide: 1,9K.

Le tout est tenu dans un réservoir en acier inoxydable, appelé "tube d'inertie", qui contient l'hélium superfluide servant à refroidir la masse froide. Le diamètre extérieur de la masse froide est de 494 mm, la longueur magnétique du quadripôle est de 3,05 m (Lefèvre et al., 95).

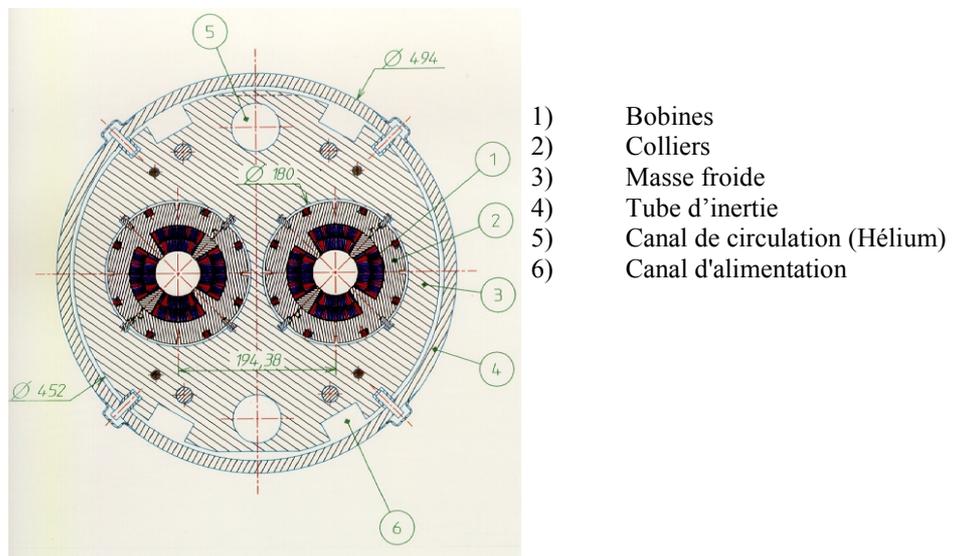


Figure 1 : coupe d'un aimant quadripolaire de l'accélérateur du LHC
Cross section of a quadripole magnet for the LHC accelerator

De nouvelles générations d'aimants supraconducteurs sont en cours de développement. Ces aimants doivent être capables de fournir des champs magnétiques plus intenses. De plus, leur environnement électromagnétique peut être fortement perturbé par la présence de champs magnétiques issus d'autres aimants proches. L'utilisation de câbles supraconducteurs en Nb₃Sn devient alors une nécessité. Un modèle d'aimant quadripolaire, d'un mètre de long avec une ouverture de 56 mm et sans circuit magnétique est en cours de réalisation au STCM. La Figure 2 illustre la section droite de cet nouvel aimant.

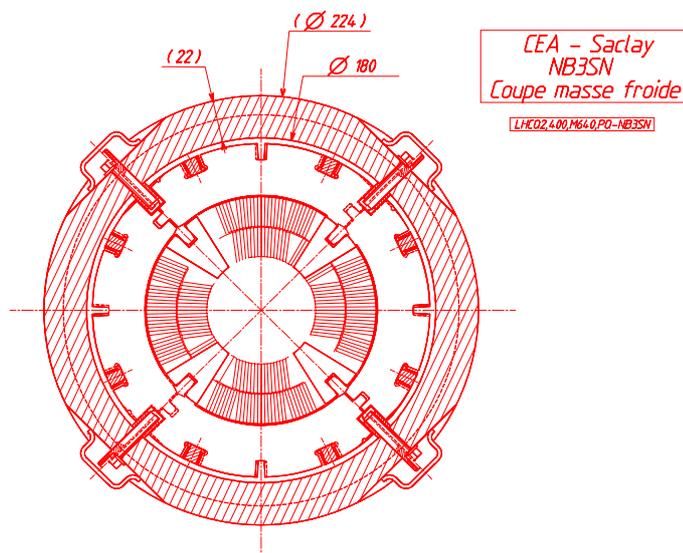


Figure 2 : Section droite d'un aimant en Nb₃Sn
Cross section of a Nb₃Sn magnet

CONCEPTION D'UN AIMANT QUADRIPOLAIRE

Au cours de la fabrication, du refroidissement et du fonctionnement d'un aimant supraconducteur, les bobines de câbles composites supraconducteurs sont soumises à des variations de contrainte mécanique. Les efforts de Lorentz, le retrait thermique différentiel des différents matériaux ont tendance à engendrer des contraintes de traction. Or, pour assurer les bonnes performances de l'aimant en fonctionnement, les bobines doivent toujours être sous contrainte de compression (blocage des conducteurs les uns par rapport aux autres).

En effet, si tel n'était pas le cas, des mouvements de conducteurs pourraient apparaître et provoquer un échauffement local responsable d'une instabilité de l'aimant en fonctionnement (départ de quench) Où pire encore, les bobines ne seraient plus maintenues mécaniquement, et cela modifierait la configuration électromagnétique de manière dramatique. C'est pourquoi, un processus de fretage est utilisé pour imposer une précontrainte azimutale de compression.

Cette précontrainte est à appliquer lors de l'assemblage afin de compenser les variations de contrainte et d'éviter un déchargement mécanique de la bobine trop important qui aurait pour cause de provoquer un départ de quench. Cependant, la précontrainte est limitée par des considérations électromagnétiques ainsi que par des contraintes de fabrication. Des modélisations mécaniques avec le logiciel CASTEM2000 permettent de déterminer et d'optimiser les différents états mécaniques de l'aimant.

Le modèle mécanique représentant un huitième de la géométrie de la section droite est illustrée dans la Figure 3. Un exemple de carte de contrainte azimutale dans les bobinages lors la mise sous excitation est représentée. Cette carte est obtenue en supposant un comportement mécanique linéaire des câbles composites supraconducteurs (Gourdin et al., 00).

La maîtrise des technologies de fabrication du composé Nb₃Sn ajoutée aux besoins de la physique des particules permet d'envisager la fabrication d'aimants capables de générer de hauts champs magnétiques. Cependant, les efforts de Lorentz engendrés par cette augmentation d'énergie électromagnétique deviennent considérables. L'optimisation des structures mécaniques permettant de reprendre ces efforts doit être de plus en plus riche et proche de la réalité. Le comportement mécanique des câbles composites supraconducteurs devient alors un élément important durant la phase de conception et de dimensionnement de ces aimants (Chichili et al., 99).

DESCRIPTION DES CABLES SUPRACONDUCTEURS

Généralités

La structure générique d'un câble supraconducteur utilisé pour nos applications peut être divisée en quatre échelles caractéristiques :

- Le filament,
- Le brin,
- Le câble,
- L'empilement de câbles isolés.

La Figure 4-A représente la structure d'un câble supraconducteur de type Rutherford. Ce câble est constitué de brins, eux même constitués de filaments. Différents systèmes d'isolation électrique peuvent être employés.

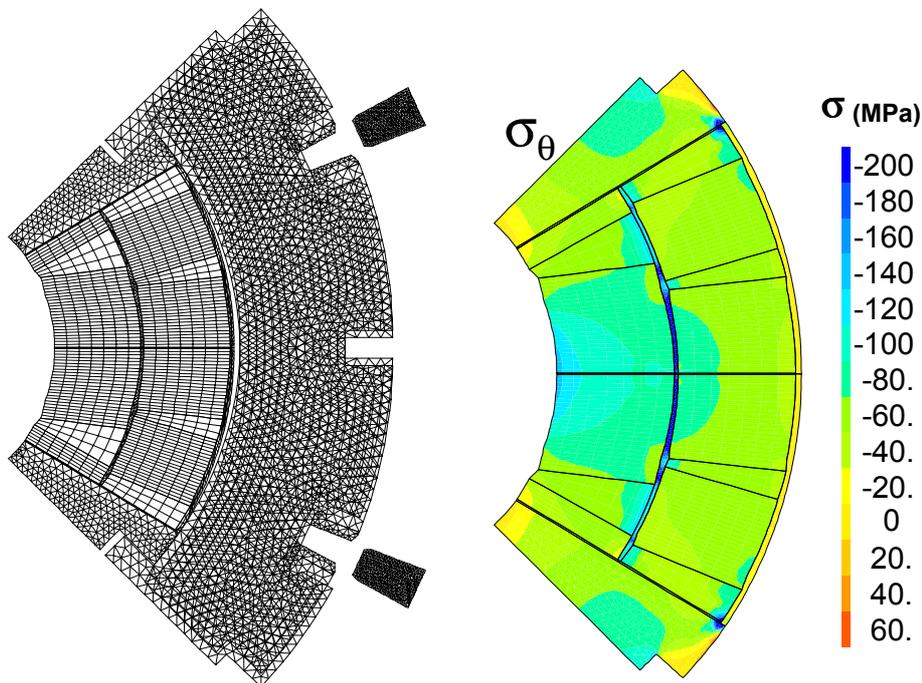


Figure 3 : Maillage et carte de champ de contrainte azimutale pour une section d'un aimant quadripolaire en Nb3Sn

Mesh and azimuthal stress in a cross section of a Nb3Sn quadrupole magnet

Le filament est constitué du matériau supraconducteur (NbTi ou Nb3Sn). Il est de forme cylindrique et son diamètre moyen est de l'ordre de quelques dizaines de microns. Le comportement du filament peut être considéré comme homogène.

Le brin est un composite multifilamentaire. Sur la coupe d'un brin en NbTi (cf. Figure 4-B) on observe un cœur en cuivre, entouré d'une multitude de filaments disposés de manière concentrique noyés dans du cuivre. Puis l'ensemble est entouré par une couronne de cuivre. Le brin est de forme cylindrique ou hexagonale d'un diamètre de l'ordre du millimètre. Durant son processus d'élaboration et pour des considérations électromagnétiques, le brin subit une torsade suivant la direction longitudinale.

Le câble supraconducteur est constitué d'un assemblage d'une trentaine de brins supraconducteurs. Ce type de câble est appelé câble de Rutherford. Leur section peut être rectangulaire ou trapézoïdale. Durant la fabrication et pour des considérations électromagnétiques, le câble subit aussi une torsade suivant la direction longitudinale.

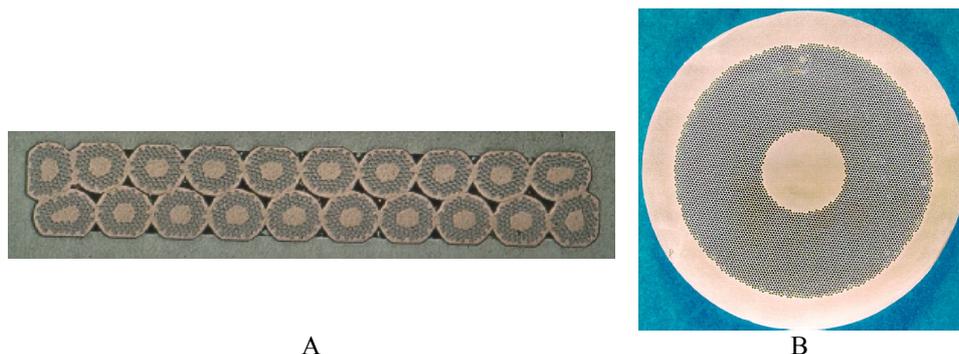
Ce câble non isolé est ensuite isolé électriquement par un guipage de polyimide ou de ruban de fibres de Silice imprégnés de résine époxy.

Exemple du câble en NbTi pour le quadripôle LHC

Le brin NbTi est constitué de filaments en alliage de Niobium et de Titane, noyé dans une matrice de cuivre. On peut observer que la coupe d'un brin est composé de plusieurs centaines de filaments en NbTi. Le câble supraconducteur en NbTi est ensuite constitué de 36 brins en NbTi d'un diamètre de 0.825 mm. Comme décrit

précédemment, le brin et le câble subissent respectivement une torsade suivant la direction longitudinale.

L'isolation électrique du câble NbTi est réalisée à l'aide d'un guipage par un ruban de Polyimide préencollé (Kapton®). Puis, l'ensemble guipé subit un cycle de polymérisation de 185°C pendant 30 minutes sous contrainte. Cette méthode permet d'obtenir un ensemble compact, et d'obtenir une cohésion mécanique des empilements de câbles.



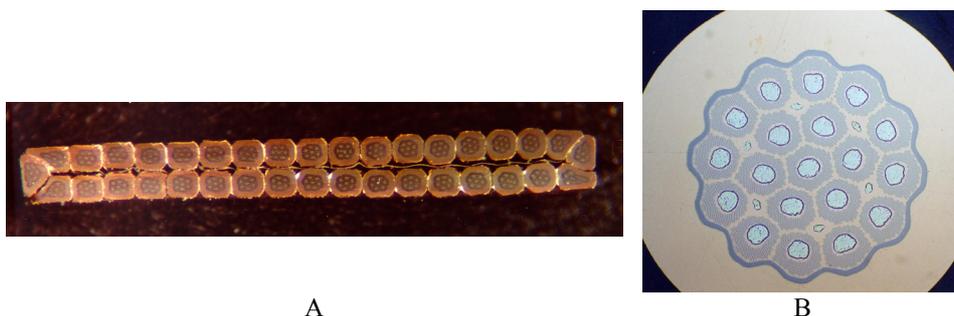
A
B
Figure 4 : section d'un câble de type Rutherford (A) et coupe d'un brin NbTi (B)
Cross section of a Rutherford cable (A) and cross section of a NbTi wire (B)

Exemple d'un câble en Nb₃Sn

Le brin de Nb₃Sn est constitué d'un composé de Niobium et d'Etain noyé dans une matrice de Cuivre. Sur la Figure 5, différentes géométries de sous ensemble de filaments sont représentées (ronds ou hexagonaux).

Le câble supraconducteur en Nb₃Sn est ensuite constitué de 36 brins en Nb₃Sn d'un diamètre de 0.825 mm. Comme décrit précédemment, le brin et le câble subissent respectivement une torsade suivant la direction longitudinale.

Contrairement au brin NbTi, la formation du composé supraconducteur Nb₃Sn est conditionnée par un traitement thermique du câble (660°C pendant 240 heures sous atmosphère d'argon), qui présente l'inconvénient de le rendre cassant et sensible à la déformation.



A
B
Figure 5 : section d'un câble de type Rutherford (A) et coupe d'un brin Nb₃Sn (B)
Cross section of a Rutherford cable (A) and cross section of a Nb₃Sn wire (B)

De plus, l'isolation électrique du câble Nb₃Sn est réalisée à l'aide d'un guipage par un ruban de fibres de Silice (deux couches), puis d'une imprégnation sous vide de résine époxy. Cette méthode permet d'obtenir un ensemble plus compact, et une cohésion mécanique plus forte.

COMPORTEMENT EN COMPRESSION - PROCEDURE EXPERIMENTALE

Les échantillons

Une fois le câble enrubanné (Kapton pour le NbTi ou fibre de silice pour le Nb₃Sn), on réalise des éprouvettes représentatives d'un élément du bobinage. Elles sont constituées d'un empilement de 10 câbles positionnés tête bêche (cf. Figure 6). Puis, ces empilements subissent, soit le cycle de polymérisation du Kapton, soit l'imprégnation sous vide de résine époxy.

Réalisation des essais de compression

Les empilements de câbles sont placés dans la rainure en forme de U d'un outillage spécifique en acier inoxydable (cf. Figure 7) puis sont comprimés suivant la direction azimutale (cf. Figure 6-B) par l'intermédiaire d'une cale, en acier inoxydable.

La procédure d'essai de compression correspond à une succession de trois cycles de compression de 2.5kN à 150kN. Les essais sont menés sur une machine électromécanique de type INSTRON. Les efforts sont mesurés par une cellule INSTRON d'une capacité de 150kN. Les déplacements sont mesurés entre le fond du moule et le bas de la cale d'appui. Pour les essais réalisés à la température ambiante, les déplacements sont mesurés grâce à des capteurs inductifs de type LVDT d'une capacité de 3mm. Pour les essais réalisés à température cryogénique dans l'hélium liquide à 4.2K, les déplacements sont mesurés grâce à des capteurs HBM, utilisant des jauges de déformation, et d'une capacité de 2.5mm. Tous ces capteurs ont été étalonnés aux températures d'essais. Enfin, signalons que ces essais sont menés à vitesse de déplacement traverse imposée.

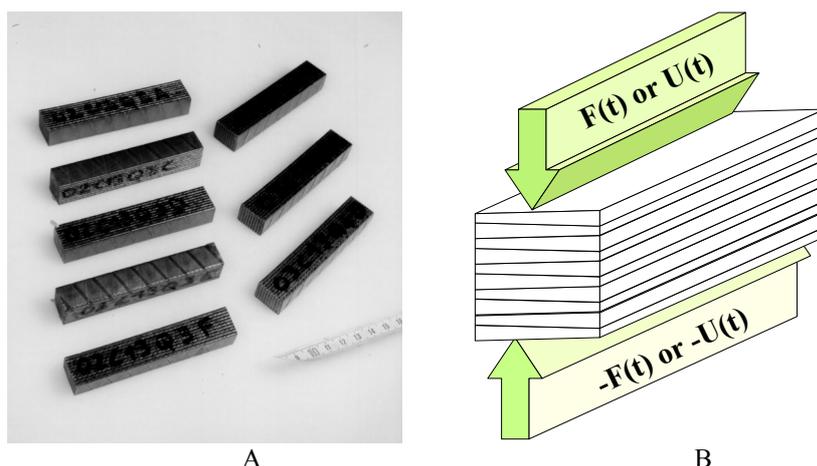
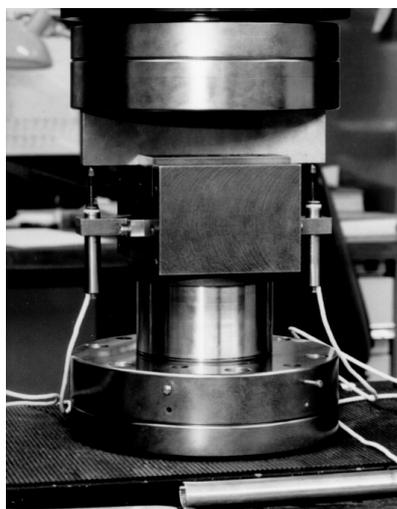
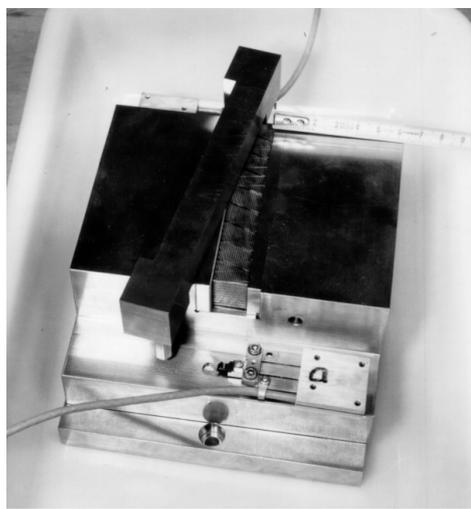


Figure 6 : éprouvettes de compression (A) et direction de sollicitation (B)
Compression samples(A) and loading direction (B)



A



B

Figure 7 : montages de compression à 300K (A) et à 4.2K (B)
Compression molds at 300K (A) and at 4.2K (B)

PRINCIPAUX RESULTATS

Les résultats obtenus sur des échantillons en NbTi et en Nb₃Sn sont présentés sur les figures suivantes. On notera que tous les essais ne sont pas faits dans le même moule.

L'allure des courbes effort - déplacement peut être décrite en plusieurs étapes. On constate que la première montée en charge est nettement différente des deux autres. Un long pied de courbe peut être observé, suivi d'un comportement linéaire dont la pente est plus faible qu'aux autres montées en charge. On constate qu'il apparaît un phénomène d'hystérésis entre le chargement et le déchargement. Puis, ces cycles semblent se stabiliser (Figure 8).

On mesure alors, à température ambiante, un module d'Young de l'ordre de 7 GPa pour les empilements de NbTi isolés par du Kapton et de 30 GPa pour les empilements de Nb₃Sn isolés avec du ruban de fibres de silice et imprégnés avec de la résine époxy.

Les essais suivants ont pour but de mettre en évidence les effets des différents systèmes d'isolation sur le comportement, de quantifier les effets de la température de sollicitation et de souligner un éventuel effet de vitesse sur les caractéristiques de ces empilements.

Un empilement de NbTi guipé de ruban de fibre de verre et imprégné de résine époxy a été sollicité à la température ambiante. On constate alors que l'empilement de NbTi est plus rigide, son module d'Young restant tout de même inférieur à celui de l'empilement de Nb₃Sn, et que l'hystérésis est réduite. L'imprégnation aurait donc pour effet de renforcer la rigidité tout en piégeant le mouvement des câbles et donc de réduire l'hystérésis associée.

L'influence de la température sur le comportement des deux types d'empilements utilisés dans nos applications est importante et doit être prise en compte dans le dimensionnement. En effet, pour les deux types de câbles isolés de manière différente, on observe (Figure 8) globalement, à température cryogénique, une élévation

tout à fait significative du module d'Young associée à une réduction de la largeur du cycle stabilisé. Cela est sans doute dû à l'élévation du module d'Young de chaque constituant avec un abaissement de la température. De plus, un mécanisme visqueux pourrait se superposer au mouvement des câbles déjà cité et expliquer la réduction de l'hystérésis à basse température.

Enfin, en vue de mettre en évidence cet éventuel comportement visqueux, des essais sur les empilements NbTi et Nb₃Sn ont été menés en faisant varier la vitesse de déplacement de la traverse de deux décades (Figure 9). On note que le comportement observé ne dépend pas de manière significative de la vitesse de sollicitation.

Ces premiers essais permettent de dégager qualitativement certains effets dont il faudra tenir compte dans les dimensionnements futurs. Mais la compréhension des mécanismes mis en jeu en vue d'une formulation complète de ces comportements n'est qu'initiale. D'autres essais plus élémentaires sont en cours à température ambiante et à température cryogénique : caractérisation en traction et compression de la résine seule, des brins, et des câbles. Ils devraient permettre une caractérisation à plusieurs échelles nécessaire à la modélisation.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Les futurs aimants à base de câbles composites supraconducteurs seront de plus en plus puissants, devront être de plus en plus petits et compacts. Les contraintes mécaniques engendrées par les efforts de Lorentz augmentent de manière considérable avec le champ magnétique. De quelques dizaines de MPa à l'heure actuelle, les prochains aimants subiront des contraintes de plusieurs centaines de MPa. Comment se comportera le câble supraconducteur, comment alors prévoir le comportement des structures ?

Une meilleure compréhension des mécanismes ainsi qu'une modélisation plus fine de ceux-ci au travers d'actions de R&D sont à mener dès aujourd'hui pour préparer les aimants de demain.

BIBLIOGRAPHIE

- M. Reytier, C. Gourdin, M. Durante, A. Devred, P. Védrine, 2000, *Characterization of the Thermal and Mechanical Behaviors of Stacks of Insulated Cables Representative of Accelerator Magnet Coil Assemblies*, Applied Superconductivity conference, Virginia Beach.
- P. Védrine, C. Nouvel, B. Gallet., 1998. *Measurement of the Thermo-Mechanical of NbTi Windings for accelerator magnets*, IEE Trans. On Superconductivity, .
- C. Gourdin, A. Devred, M. Durante, 2000, *Design of Nb₃Sn magnet*, European Particule Accelerator Conference, Vienne.
- P. Lefèvre and al., 1995. *The Large Hadron Collider, Conceptual Design*, CERN Desktop Publishing Service, Genève.
- D.R. Chichili, T.T. Arkan, I. Terechkin., 1999. *Investigation of Cable Insulation and Mechanical Properties of Niobium-Tin Composite*, FERMILAB, Particule Accelerator Conférence, New York.
- E. Le Fichoux, 1998. *Présentation et utilisation de CASTEM2000*, CEA.

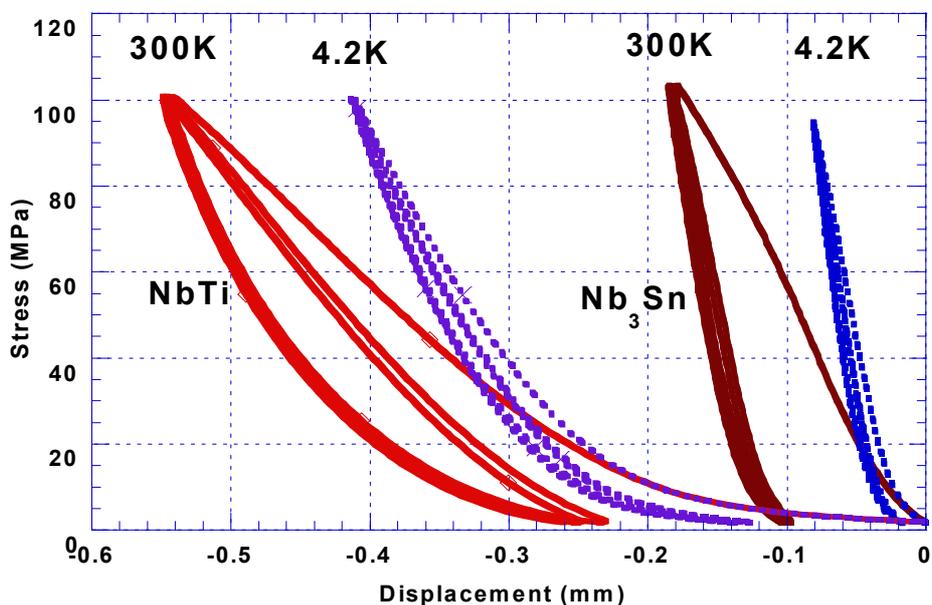


Figure 8 : Comportement mécanique d'empilements en NbTi et Nb₃Sn
Mechanical behaviour of a NbTi and a Nb₃Sn ten stack

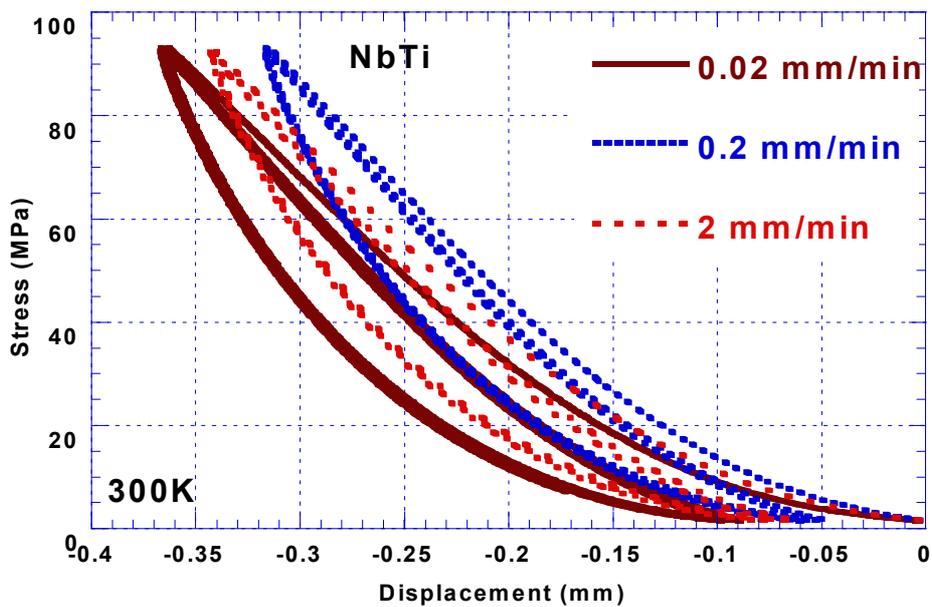


Figure 9 : Comportement mécanique d'empilements en NbTi et Nb₃Sn à différente vitesse de chargement
Mechanical behaviour of a NbTi and a Nb₃Sn ten stack with different loading speed