Association EUR-CEA / CG79
Décembre 2005

Association EURATOM - CEA
Fusion contrôlée

Comité de Gestion n° 79

Compte Rendu d'Activité
COLLABORATIONS NATIONALES
(Universités et CNRS)

Novembre 2004 - Octobre 2005

PROJET Φ6 : « Supraconducteurs »

Responsable Association : P. Libeyre

MOTIVATION - Le système magnétique est l'élément majeur des machines de fusion contrôlée par confinement magnétique et la construction des futurs réacteurs de fusion reposera sur le développement d'aimants supraconducteurs, seuls susceptibles de permettre un fonctionnement fiable et économique. L'Association Euratom-CEA joue le rôle principal en Europe dans le développement des aimants supraconducteurs pour la fusion et est en particulier à l'origine du concept de conducteur câble-en-conduit à canal central, refroidi par circulation forcée d'hélium supercritique, qui a été retenu pour les conducteurs d'ITER et qualifié par la construction des deux bobines modèles du solénoïde central et du champ toroïdal. Afin d'optimiser les performances de ces conducteurs, qui utilisent le Nb_3Sn comme matériau supraconducteur des aimants à haut champ (solénoïde central, aimant de champ toroïdal) et le NbTi pour les aimants à bas champ (bobines de champ poloïdal, bobines de correction), il est nécessaire de mieux appréhender les phénomènes qui régissent leur comportement. C'est pourquoi deux actions sont engagées en collaboration avec des laboratoires du CNRS : l'une en thermohydraulique, l'autre en mécanique. La première vise à l'analyse et à la compréhension des transferts thermiques d'une part entre les structures entourant le conducteur et le conducteur lui-même et d'autre part à l'intérieur du conducteur entre la zone annulaire contenant les brins supraconducteurs et le canal central. La seconde a pour objectif la modélisation du comportement mécanique des brins supraconducteurs constituant le câble en vue de son optimisation.
Enfin, dans la perspective de l'utilisation future des matériaux supraconducteurs à haute température critique pour les aimants des réacteurs de fusion, une action de collaboration est lancée avec un laboratoire du CNRS pour analyser les possibilités d'utilisation de tels matériaux en fonction de leurs performances mécaniques et électriques.

Thème Φ6.1 : *Détermination des coefficients d'échanges thermiques dans les câbles en conduit supraconducteurs d'ITER* (J.-L. Duchateau ; L. Tadrist, Université de Provence, Aix-Marseille I, Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels, IUSTI, UMR-6595 CNRS)

6.1.1. Objectifs et contexte

Le laboratoire de l'IUSTI travaille depuis de nombreuses années dans le domaine de la modélisation des écoulements et transferts de chaleur. Dans le cadre de la présente étude il s'agit, sur la base de l'expérience acquise au laboratoire, d'évaluer la faisabilité de la mise en place et de l'utilisation d'un modèle numérique (type CFD, basé sur l'utilisation d'un code de calcul industriel, Fluent) pour analyser les transferts de chaleur et les écoulements de fluide cryogénique au sein d'un câble supraconducteur en vue de l'amélioration de ses performances thermo-hydrauliques.

Il s'agit d'étudier la faisabilité de la réfrigération d'un câble supraconducteur (figure 6.1.1) siège de production de chaleur (effet Joule…) et donc de modéliser les échanges thermiques ainsi que l'écoulement au sein d'une canalisation de géométrie complexe.

Figure 6.1.1 – Coupe d'un cable supraconducteur

6.1.1.1. Géométrie du problème.

Nous avons étudié un échantillon de câble à fin d'évaluer les caractéristiques géométriques de ce système. Le câble à étudier est constitué d'un tressage de fils entourant une zone centrale vide. L'ensemble des fils est maintenu en place par une hélice métallique centrale et la gaine extérieure (figure 6.1.2).

La coupe radiale (figure 6.1.1) nous permet de visualiser la forme caractéristique. Nous pouvons décomposer le tube en trois grands sous-ensembles : la partie extérieure (gaine d'épaisseur 2 mm en inox paramagnétique), les fils regroupés en pétales et la partie centrale.

On distingue six groupements de 180 fils chacun de 0.82 mm de diamètre constitués pour parti de cuivre et le reste de niobium-étain. Nous appellerons un de ces groupements « pétale ». Chaque pétale est torsadé autour de la partie centrale, le pas de torsion est approximativement de 600 mm. On pourra noter que chaque pétale est enrobé d'une fine pellicule d'inox.

En outre, il est intéressant de remarquer que les fils constitutifs de chaque pétale sont tressés par trois formant ainsi des fagots. Les fagots sont eux-mêmes tressés par trois et ainsi de suite jusqu'à obtenir la forme finale du pétale.

La partie centrale elle aussi en inox paramagnétique. Les données géométriques qui nous ont été fournies montrent qu'il existe plusieurs configurations en ce qui concerne l'épaisseur, le pas, le gap….

Figure 6.1.2 – Constitution du cable supraconducteur

Les caractéristiques observées ici sont uniquement indicatives et doivent servir de base pour évaluer la faisabilité de la modélisation de ce système.

Les caractéristiques précises des éléments seront abordées dans une phase ultérieure de cette étude.

A. Travaux effectués

Compte tenu de la complexité géométrique de ce système, deux approches sont mises en place pour ce travail :

- modéliser la structure en assimilant les fagots de fils à un milieu poreux en vue d'accéder à des grandeurs locales macroscopiques (champs de température, échange de fluide entre zone centrale et partie poreuse….) ;
- la prédiction des propriétés du poreux à partir de la simulation locale (i.e. à l'échelle du pore) des écoulements et des transferts de chaleur dans des cellules représentatives.

Pour ces deux parties le travail consistera à développer des modèles de configurations géométriques simplifiées pour tester les limites de ces approches et vérifier la faisabilité de l'étude dans une configuration réaliste.

B. Approche microscopique

L'objectif de ce travail est d'évaluer la faisabilité de la prédiction de propriétés macroscopiques - lois d'écoulement (perméabilité et passabilité), de transferts de chaleur (conductivité thermique effective, dispersion…) - à partir des données géométriques à l'échelle du pore et des caractéristiques des matériaux.

Dans un premier temps nous avons considéré deux types d'arrangement des fils l'un triangulaire et l'autre carré. Nous obtenons donc 2 formes d'interstices pour lesquelles nous avons étudié les lois d'écoulement. Pour cette phase de faisabilité nous avons considéré des canaux droits.

6.1.1.2. Détermination des propriétés du milieu poreux

A. Arrangement triangulaire des fils

Nous avons considéré un canal défini à partir de l'interstice entre trois fils compris entre deux réservoirs pour étudier les lois de perte de charge dans un tel système. Après avoir identifié et résolu les problèmes liés au maillage en 3 dimensions de notre système (angles vifs, intersections de surfaces… ; figure 6.1.3), nous sommes parvenus au résultat suivant qui nous a permis de déterminer les lois d'écoulement dans ce type de canaux.

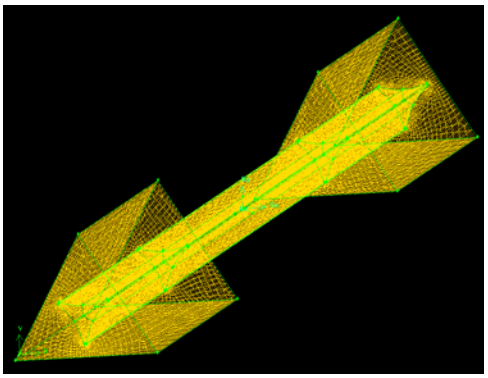

Figure 6.1.3 - Vue du maillage de surface d'un canal triangulaire. Le nombre de volumes élémentaires obtenu est de 360000.

B. Arrangement carré des fils

Comme pour la configuration triangulaire il est nécessaire de « couper » les angles vifs pour des raisons de qualité de maillage, ce qui induit des paramètres supplémentaires (gestion de l'épaisseur de découpe) dans les modèles mais permettra une prise en compte simplifiée de communication fluide entre canaux adjacents (figure 6.1.4).

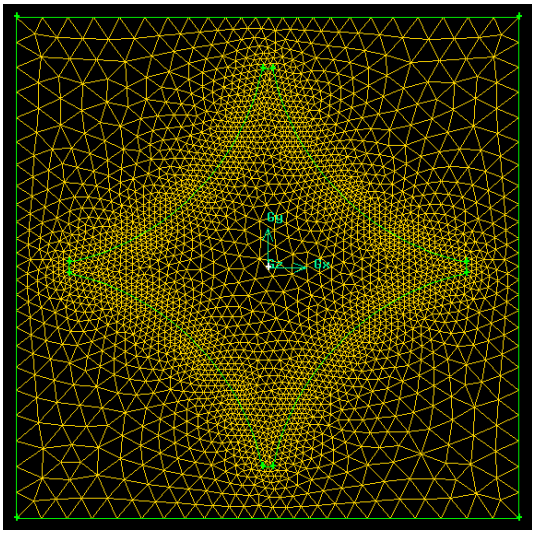

Figure 6.1.4 - Vue du maillage de surface d'un canal carré

C. Détermination des propriétés du poreux

A partir de la connaissance du profil de pression et de la vitesse dans un canal, il est possible d'obtenir la perméabilité (K), la passabilité (β) d'un milieu poreux constitué de tels canaux parallèles (figure 6.1.5). Remarquons qu'il s'agit ici des grandeurs dans l'axe principal de l'écoulement et que la détermination de ces quantités pour la direction radiale du câble nécessite la modélisation simultanée de plusieurs canaux ainsi que l'étude de la forme des communications entre ces derniers.

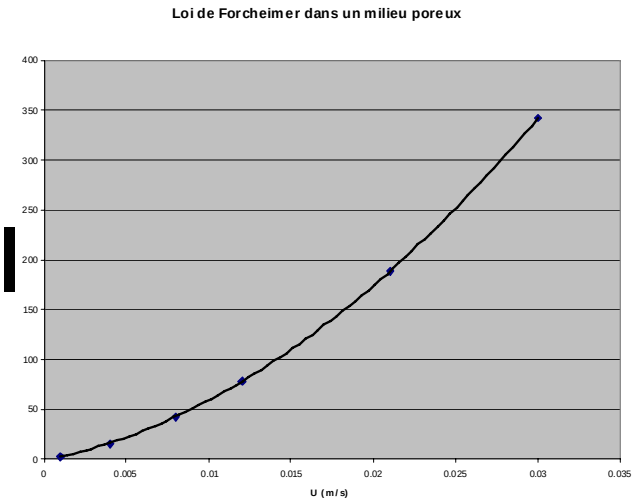

Figure 6.1.5 - Détermination de la passabilité et perméabilité dans l'axe du canal pour un réseau de canaux de section curviligne « carrée »

6.1.1.3. Conclusion

Ces types de géométrie constituent la forme de base à considérer pour notre problème et il sera nécessaire de la multiplier un grand nombre de fois pour pouvoir déterminer l'influence des variations des paramètres géométriques sur les propriétés effective d'écoulement et de transfert de chaleur du faisceau de fils. Cela est possible, certes, mais restera coûteux en terme de temps de calcul et de mise en place des modèles (temps de réalisation du maillage, réalisation des géométries souhaitées, exploitation des résultats à partir d'un volume de données important).

Il est possible de remonter à des propriétés effectives d'un milieu poreux constitué de tressage de fils. Néanmoins, ce type d'approche restera limité du fait de la lourdeur du traitement de la géométrie considérée. En particulier, l'influence des paramètres géométriques dans la modélisation de l'écoulement d'un fluide dans ce type de conduite est importante. Plusieurs facteurs peuvent modifier significativement les propriétés effectives à déterminer et constituent des pistes d'analyses, comme :

- l'arrangement des fils (fagots, torsion…) ;
- le diamètre des fils ;
- la torsion des fils (pas de l'hélice) ;
- la typologie des irrégularités : communication continue des interstices ; communication discontinue.

6.1.2. Approche milieu poreux, Etude 3D.

Dans cette partie nous nous sommes intéressés à la mise en place de la simulation des transferts de chaleur couplés aux écoulements dans le câble.

Dans ce cas 3D, pour limiter la taille des maillages ainsi que les temps de calcul, nous considérons uniquement un secteur du câble : étude dite « en pétale ». Nous allons représenter l'écoulement dans 2 demi-pétales séparés par une paroi étanche (cas le plus défavorable pour les transferts).

Nous avons étudié deux configurations :

- l'écoulement dans une section rectiligne ;
- les transferts dans une section hélicoïdale.

6.1.2.1. Maillages et conditions aux limites

Nos deux études s'effectueront sur une longueur de 0.6 m (soit une période de l'hélice des fils). Au niveau des écoulements nous imposons une différence de pression arbitraire entre l'entrée et la sortie En ce qui concerne la source de chaleur dissipée par les fils, nous choisissons arbitrairement une valeur de 1000 W/m^3 uniforme dans tout le poreux.

Les différents maillages réalisés ont permis de mettre en évidence les difficultés inhérentes à la prise en compte de ce type de géométrie. Nous avons pu aboutir à un compromis raisonnable en termes de précision du maillage rapporté au temps de mise en œuvre, de calcul et de post-traitement. Les maillages réalisés comportent entre 200 000 et 2 000 000 de volumes.

6.1.2.2. Quelques résultats pour le cas de deux demi-pétales twistés

Nous présentons ici les champs de vitesse en entrée et sortie du système qui mettent en évidence une redistribution du fluide vers la zone centrale (figure 6.1.6). Cet effet est plus ou moins marqué selon les valeurs retenues de perméabilité et passabilité dans les deux directions. L'anisotropie de propriété inhérente à ce type d'arrangement de fibre conduit cependant à conserver un écoulement significatif dans la zone poreuse pour les gammes de valeur retenues dans cette étude préliminaire.

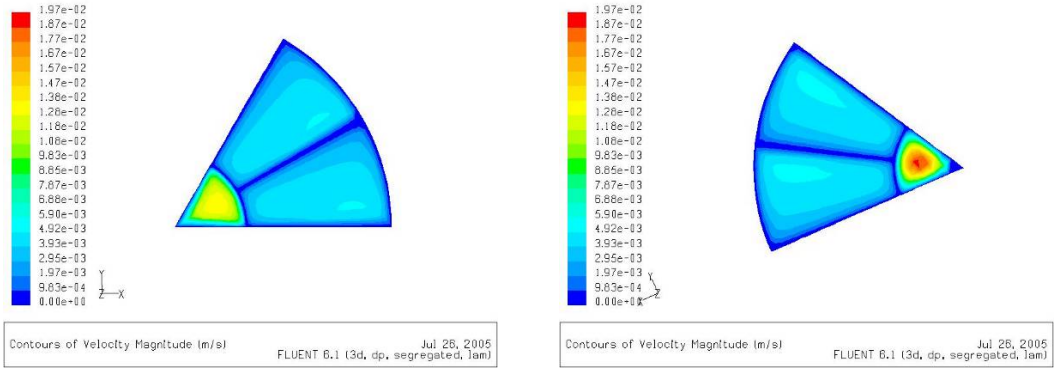

Figure 6.1.6 - Champs de vitesse en entrée (gauche) et sortie (droite) du système

La figure 6.1.7 montre l'impact de la source de chaleur à l'intérieur du milieu poreux. Il apparaît clairement un échauffement préférentiel de la zone poreuse dû à la source volumique et à l'écoulement limité dans ce domaine.

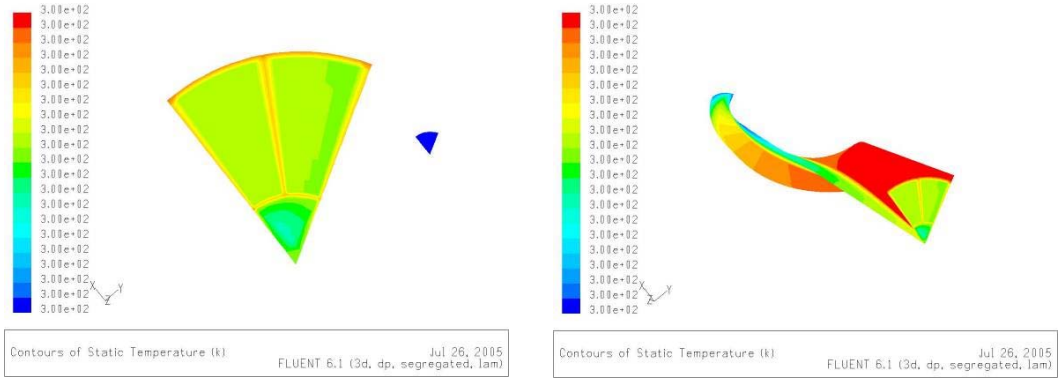

Figure 6.1.7 - Impact de source de chaleur à l'intérieur du milieu poreux : (gauche) champ de température ; (droite) devant, section de sortie, en fond, section d'entrée supposée isotherme

6.1.2.3. Conclusion

La faisabilité de la simulation des transferts dans le câble a été démontrée. La représentation de la géométrie sous forme de milieux poreux « twistés » permet d'appréhender les phénomènes en conservant un maillage raisonnable du système.

L'influence des propriétés physique du milieu peut donc être abordée pour évaluer son impact sur le dimensionnement du système et optimiser la géométrie.

Par ailleurs, l'analyse des résultats montre qu'il serait important de développer une étude plus spécifique concernant la partie centrale et plus particulièrement la modélisation de l'interaction de l'écoulement turbulent au sein de la zone fluide avec l'interface poreuse pour permettre à terme une prise en compte précise des échanges de chaleur et de fluide à ce niveau.

6.1.3. Conclusions

Cette étude de faisabilité a permis de démontrer la possibilité de simuler les transferts de chaleur et les écoulements dans les câbles supraconducteurs.

La détermination a priori des propriétés effectives du milieu à partir des données géométriques semble en revanche plus limitée du fait des difficultés liées au volume de calcul et à la prise en compte des particularités géométriques locales conditionnant ces paramètres.

Les problématiques liées à la réalisation du maillage et à l'exploitation des volumes de données générés ont été abordées avec succès pour l'étude macroscopique du câble. En particulier, la réalisation du modèle complet (écoulement et thermique) d'une ou plusieurs périodes de l'enroulement des fagots de fils est abordable et pourra apporter des informations précises au niveau des champs de température et des écoulements à partir de la caractérisation des propriétés du milieu poreux. Ceci permettra, in fine, une optimisation de la géométrie de ces câbles supraconducteurs par rapports aux contraintes thermo-hydrauliques imposées par le système cryogénique.

A l'issue de cette phase d'essais, la mise en place de modèles plus détaillés (turbulence) de la zone centrale (impact de la géométrie de l'hélice) et l'analyse des transferts de fluide de la zone poreuse vers le cœur de l'écoulement parait souhaitable pour permettre une prise en compte précise de ces phénomènes et de leur impact sur le comportement global du câble.

Participants CNRS/Université : L. Tadrist, F. Topin

Thème Φ6.2 : *Modélisation mécanique de câbles supraconducteurs* (P. Libeyre ; D. Durville, École Centrale Paris, Laboratoire de Mécanique des Sols, Structures et Matériaux, MSSMAT, UMR-8579 CNRS)

Les câbles supraconducteurs des électro-aimants utilisés pour la fusion par confinement magnétique sont constitués en assemblant des brins élémentaires en plusieurs étages successifs de torons, les torons d'un étage étant torsadés entre eux pour former un toron de l'étage supérieur. On parvient ainsi à constituer un assemblage pouvant contenir jusqu'à un millier de brins. Les propriétés conductrices de ces assemblages se révèlent cependant très dépendantes des déformations engendrées à l'échelle locale au niveau de chaque brin. La prévision de ces déformations, en particulier sous le chargement magnétique créé en service, est nécessaire pour optimiser les caractéristiques de ces conducteurs.

Dans une première phase d'étude, on a cherché à reproduire, avec le logiciel Multifil développé à l'ECP, le résultat de la mise en forme de ces conducteurs afin d'obtenir une description géométrique précise, jusqu'alors inaccessible, de chacun des brins dans l'assemblage final. La complexité de cette simulation réside dans la détection et la modélisation des interactions de contact-frottement générées au niveau des nombreuses zones de contact entre les brins. Des modèles adaptés et des algorithmes optimisés sont nécessaires afin de pouvoir résoudre un problème présentant de nombreuses non-linéarités et un grand nombre de degrés de liberté.

6.2.1. Présentation de la démarche

6.2.1.1. Caractéristiques de l'outil de simulation Multifil

La modélisation entreprise dans cette étude s'appuie sur le logiciel Multifil, développé pour la simulation du comportement mécanique des câbles. La problématique principale traitée par Multifil est celle du calcul des interactions de contact-frottement au sein d'une collection de poutres soumises à de grandes transformations. La résolution de ce problème par la méthode des éléments finis s'appuie sur trois éléments essentiels :

- le développement d'un élément de poutre original à cinématique enrichie, permettant de prendre en compte des déformations planes des sections de ces poutres ;
- la détection automatique des contacts entre ces poutres, par l'intermédiaire de la construction de géométries intermédiaires dans les zones de proximité entre ces poutres ;
- des modèles numériques adaptés pour la modélisation des efforts de contact-frottement qui permettent une bonne convergence des algorithmes.

6.2.1.2. Objectifs et méthodologie

Les données du problème sont d'une part la description de l'architecture de chaque assemblage, c'est-à-dire les pas de torsadage pour chacun des étages de toronages, et d'autre part la géométrie du conducteur final, considéré comme un cylindre dont la section se présente soit sous forme circulaire pour certains conducteurs modèles, soit sous forme de pétale pour les conducteurs de type ITER.

Le but de la démarche est de chercher à reproduire l'effet global des différentes étapes de mise en forme sur les brins de l'assemblage. L'idée consiste à partir d'une configuration arbitraire initiale, dans laquelle tous les brins sont représentés sous forme d'hélices sur plusieurs étages, en respectant les pas appliqués pour les différents niveaux de toronage, puis à venir déformer cet assemblage à l'aide d'outils rigides jusqu'à venir le conformer aux dimensions du conducteur final.

Les obstacles rigides utilisés pour déformer les brins se présentent sous forme de plans ou de cylindres et permettent de réaliser aussi bien des compressions radiales que des mises en pétale. Pour la mise en pétale, on s'est limité pour l'instant à des cylindres à une génératrice droite, alors que dans la réalité cette génératrice est une hélice, ce qui complique la définition géométrique des obstacles. On fait cependant l'hypothèse que cette différence de géométrie n'a pas une grande influence sur l'arrangement des brins au sein de ces cylindres.

6.2.1.3. Développements

La mise en oeuvre de la méthodologie proposée a nécessité deux développements essentiels dans Multifil.

- Description géométrique des assemblages initiaux : la géométrie des brins dans les assemblages initiaux est décrite par des hélices imbriquées. La génération automatique des géométries particulières de ces brins dans la configuration initiale, à partir de la description de l'architecture de l'assemblage, a été introduite. Le maillage de ces brins est ensuite généré en interne par le logiciel.
- Prise en compte de la mise en forme par des outils rigides : pour simuler la mise en forme de l'assemblage, la prise en compte de nouveaux éléments de contact entre les brins et des obstacles rigides mobiles a été introduite dans le code. Le pilotage des positions de ces outils est décrit dans un fichier de données.

6.2.2. Simulations réalisées

Deux types de conducteurs ont été étudiés, dont les caractéristiques sont décrites dans le tableau ci-dessous.

Conducteur	Architecture	Nb. de brins	Pas (mm)	Long. étudiée (mm)	Nb. de d.d.l.
Saman	3x3x5x4	180	85, 125, 160, 180	160	130 000
ITER	3x4 + 3x3x5x5	237	(25, 62) + (25, 62, 109, 162)	100	170 000

Pour chaque conducteur, on a réalisé deux mises en forme différentes : une compression radiale, et une mise en pétale. Les simulations ont été réalisées sur un calculateur parallèle, en utilisant huit processeurs, et prennent environ 48 heures pour chaque cas.

6.2.3. Résultats

Les simulations de mise en forme des assemblages constituant les conducteurs permettent de décrire la géométrie de chacun des brins. À un premier niveau, la visualisation des configurations à l'état initial et à l'état final (figures 6.2.1 et 6.2.2), permet par exemple de constater une localisation des contraintes les plus importantes au niveau des angles des pétales.

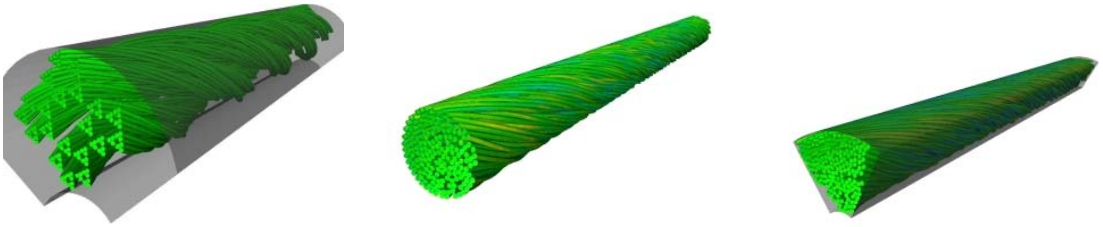

Figure 6.2.1 - Conducteur Saman : Configuration initiale - compression radiale - mise en pétale

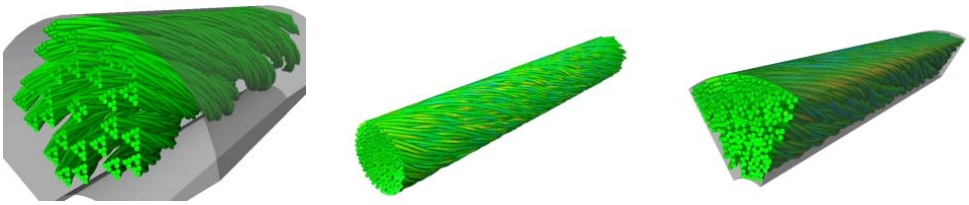

Figure 6.2.2 - Conducteur ITER : Configuration initiale - compression radiale - mise en pétale

Des informations ayant peut-être davantage de sens physique peuvent être tirées d'une exploitation a posteriori des grandeurs décrites dans les fichiers résultats. Ainsi, les distributions des niveaux de courbure en tous les nœuds des structures (figure 6.2.3), permettent de constater que les courbures ne sont pas uniformes dans ce type d'assemblage, et d'évaluer l'évolution de ces courbures.

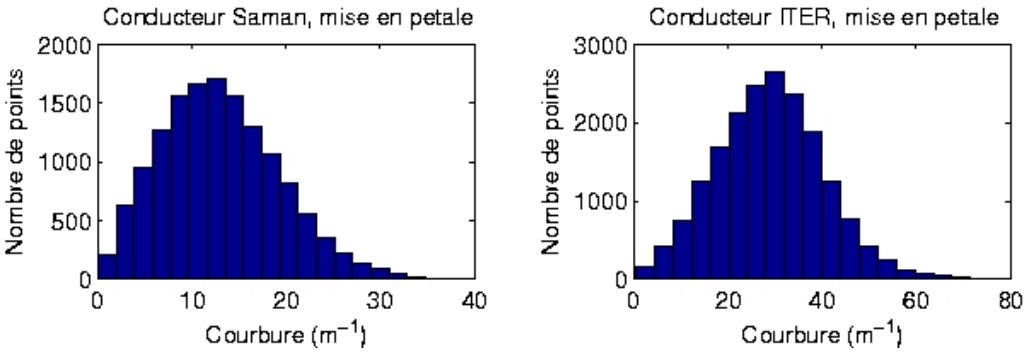

Figure 6.2.3 - Distributions des courbures à l'issue de la mise en pétale pour le conducteur Saman et le conducteur ITER

Enfin, les quantités calculées et sorties au niveau des contacts peuvent aussi être analysées pour faire ressortir des informations plus globales et statistiques. On peut ainsi avoir accès aux distributions des longueurs des zones de contact entre fils (figure 6.2.4, gauche) ou aux longueurs cumulées de contact pour chaque fil avec la gaine externe (figure 6.2.4, droite). Dans ce dernier cas, on peut constater que sur la longueur étudiée (100 mm), tous les fils ne viennent pas en contact avec la gaine externe.

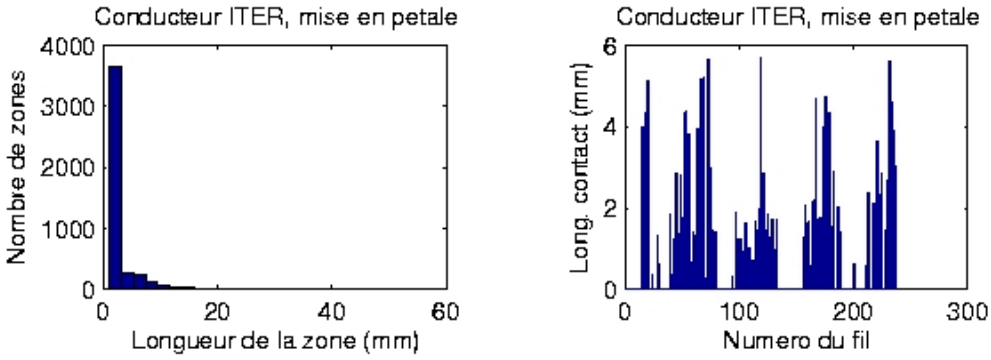

Figure 6.2.4 – (gauche) Distribution des longueurs des zones de contact entre brins. (droite) Longueurs de contact entre chaque fil et la gaine externe

6.2.4. Conclusions et perspectives

L'étude effectuée permet de vérifier la validité de l'approche adoptée dans le logiciel Multifil pour aborder les problématiques liées aux câbles supraconducteurs. Les simulations de mise en forme d'assemblages réels ont pu être menées avec des temps de calcul raisonnables. Les informations fournies par le calcul et décrivant dans le détail l'état de la structure, si elles sont suffisamment exploitées et analysées, devraient permettre une bien meilleure compréhension des phénomènes pilotant le comportement de ces conducteurs.

La prochaine étape concernant la détermination de la géométrie des brins au sein du conducteur consiste en un essai de validation expérimentale. L'idée serait de reconstruire une représentation 3D des brins dans un assemblage réel à partir d'analyses d'images de coupes réalisées régulièrement le long de l'assemblage.

L'approche mise en oeuvre dans cette étude peut ensuite être utilisée en rapport avec des problématiques diverses. Des questions semblent se poser quant à la facilité de réalisation pratique des différentes formes d'assemblages. Il serait intéressant d'essayer de tirer des simulations de mise en forme réalisées des efforts au niveau des outils et dans les brins, pour vérifier s'ils peuvent corroborer des critères de faisabilité de tel ou tel assemblage.

À l'issue de l'opération de cuisson de l'assemblage, un différentiel entre les dilatations thermiques des brins et de la gaine d'acier place a priori l'assemblage en état de compression, ce qui peut entraîner des déformations locales dégradant les propriétés conductrices. La simulation de ce mécanisme devrait être possible à l'aide du logiciel Multifil, donnant ainsi accès aux déformations qu'il induit dans les brins.

Enfin, ce sont surtout les forces de Laplace créées en service qui viennent solliciter le conducteur, provoquant des déformations dans les brins, et éventuellement des glissements progressifs au sein de l'assemblage. L'introduction de ce type de force dans la modélisation devrait permettre d'analyser en détail l'effet du chargement par des forces magnétiques.

Pour répondre à toutes ces questions, l'outil de simulation présente deux intérêts majeurs. En premier lieu, il offre une description fine de l'état de la structure en tout point, donnant potentiellement accès à un ensemble très riche d'informations. Mais il permet par ailleurs de tester facilement des architectures d'assemblage différentes, devenant ainsi un outil d'optimisation de ces structures.

Participants CNRS/Université : D. Durville

Thème Φ6.3 : ***Fils BiSrCaCuO pour la fusion, caractérisations $I_c(T)$ sous 7 T*** (D. Ciazynski ; P. Tixador, CNRS, Grenoble, Centre de Recherches sur les Très Basses Températures, CRTBT, UPR-5001 CNRS)

Les supraconducteurs à haute température critique laissent entrevoir des perspectives extrêmement intéressantes pour la fusion thermonucléaire. La première génération de fils "haut T_c" a atteint maintenant un stade préindustriel avec des longueurs kilométriques et des performances assez reproductibles. Aux basses températures, ces conducteurs présentent des densités de courant élevées qui se conservent sous de très forts champs magnétiques, en particulier pour le composé $Bi_2Sr_2CaCu_2O$ (Bi-2212). Les valeurs mesurées sont bien au-delà des possibilités des conducteurs conventionnels, y compris le Nb_3Al.

La caractéristique critique $I_c(B)$ est la grandeur de base pour le dimensionnement, mais elle est compliquée dans un supraconducteur à haute température critique par l'anisotropie de ces matériaux. Le matériau de départ est fortement anisotrope avec un empilement des plans ab, dit plans supraconducteurs, et un axe c perpendiculaire. Les plans ab sont beaucoup plus favorables que l'axe c à la supraconductivité, en particulier les propriétés de transport. Le rapport du deuxième champ critique H_{c2} entre les plans ab et l'axe c atteint 200. Cette forte anisotropie est conservée par les procédés de fabrication du ruban, en particulier le laminage, qui favorise la texturation des grains élémentaires d'autant qu'ils se présentent sous forme de plaquettes. Dans ces conditions, l'axe c est perpendiculaire à la grande face du ruban. Cela correspond à la position transversale du champ (figure 6.3.1) qui est défavorable pour les propriétés de transport. La position longitudinale (figure 6.3.1) correspond aux plans ab et est plus favorable pour le courant critique du ruban.

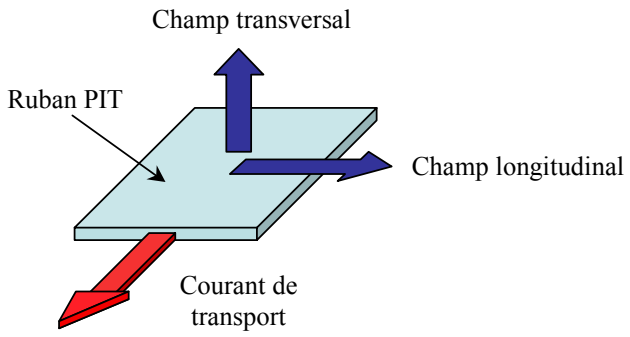

Figure 6.3.1 - Champs transversal et longitudinal pour un ruban PIT.

6.3.1. Ruban mesuré

Nous avons mesuré les caractéristiques J_c (T, B_e = 7 T) en champs longitudinal et transversal pour des rubans PIT (Powder In Tube) Bi-2212 provenant de NEXANS. Les principaux paramètres du ruban sont rassemblés dans le tableau suivant et la figure 6.3.2 donne une coupe de ce ruban.

Ruban PIT Bi2212 mesuré

Largeur	3,99 mm
Épaisseur	0,29 mm
Nombre de filaments	85
Matrice autour des filaments	Ag
Gaine extérieure	AgMg
Fraction supraconductrice	≈ 30 %

Figure 6.3.2 - Coupe du ruban PIT Bi2212 mesuré (Nexans).

La gaine extérieure en AgMg améliore nettement les propriétés mécaniques du ruban, en particulier repousse la contrainte mécanique dite critique au-delà de laquelle le courant critique décroît rapidement.

6.3.2. Dispositif de mesure

Les mesures de courant critique sont faites dans un cryostat à température variable. L'échantillon est refroidi par une circulation d'hélium gazeux par pompage au-dessus d'un bain d'hélium liquide. La température du gaz est régulée via une résistance qui réchauffe le gaz, sauf pour des tests à 4,2K.

C'est le porte échantillon (figure 6.3.3) qui pivote pour faire varier l'angle entre l'induction magnétique et le conducteur. Cette canne de mesure est faite pour de petits échantillons si bien que les rubans étudiés sont courts et les prises de potentiel rapprochées, de l'ordre de 10 mm entre elles. L'induction magnétique est créée par une bobine supraconductrice NbTi de type solénoïde et refroidie dans un bain d'hélium liquide (figure 6.3.4).

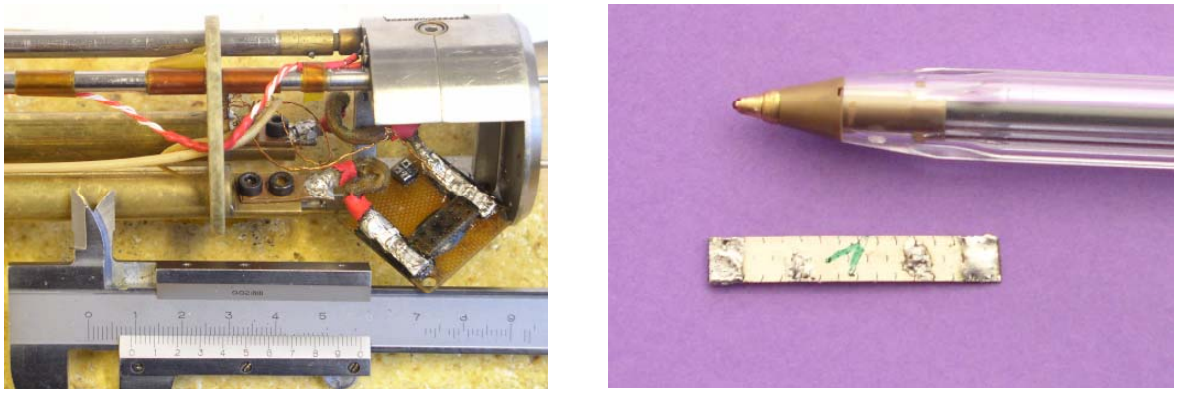

Figure 6.3.3 - Porte échantillon avec ses deux amenées de courant et ruban mesuré.

Le pilotage de la mesure et l'acquisition des données sont réalisés par une carte temps réel et un programme Labview. La rampe du courant est programmable. L'alimentation est automatiquement coupée dès que la tension dépasse un seuil programmé.

Les tensions sur l'échantillon sont tout d'abord pré-amplifiées par un préamplificateur très bas bruit à gain variable (typiquement 1000). Le signal est alors amplifié (typiquement 100) et isolé avant d'être transmis à la carte d'acquisition. La figure 6.3.5 donne une courbe V(I) sans aucun traitement. Elle indique que le bruit n'est pas négligeable. Dans ces conditions, les mesures sont souvent faites avec le critère 1000 µV/m et non 100 µV/m qui est la valeur classique pour les SHTC. Comme la caractéristique critique n'est pas très raide (indice de transition résistive, « n », de 5 à 6, figure 6.3.5), le critère de champ électrique joue un rôle important dans la détermination du courant critique. Avec un indice de 6, un rapport de 10 sur le critère en champ électrique donne un écart de 50% environ pour les courants critiques.

Figure 6.3.4 - Cryostat de la bobine supraconductrice et cryostat de la canne de mesure.

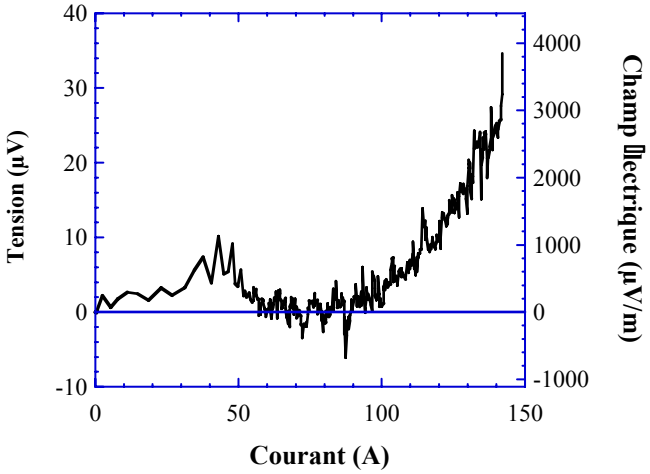

Figure 6.3.5 - Courbe tension – courant pour un ruban sous 4 T (longitudinal) et à 20 K.

6.3.3. Mesure de courant critique

La figure 6.3.6 donne les courants critiques et les densités globales de courant en fonction de la température sous une induction transversale et longitudinale de 7 T.

La figure 6.3.7 donne la caractéristique critique $I_c(B)$ à 20K en inductions longitudinales et transversales. Le courant critique de ce ruban atteint 500 A en champ propre et à 4,2K.

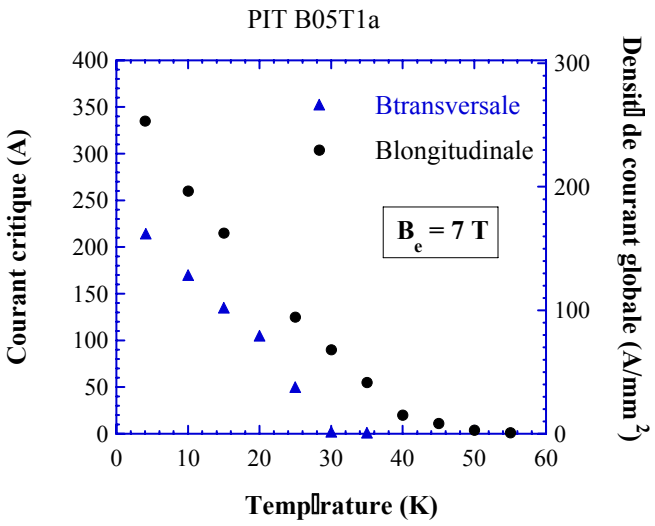

Figure 6.3.6 - Courants critiques en fonction de la température pour des inductions transversales et longitudinales de 7 T (critère 1000 µV/m).

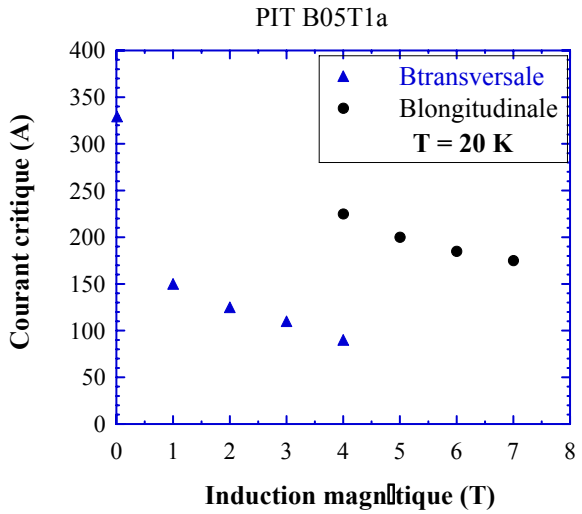

Figure 6.3.7 - Caractéristiques critiques en inductions transversales et longitudinales à 20 K.

6.3.4. Perspectives

La chaîne d'acquisition des données sera revue pour essayer de réduire le bruit de l'expérience et pouvoir extraire une valeur de courant critique avec le critère de 100 µV/m et d'accéder à l'indice de transition résistive avec une précision correcte. Ces mesures seront poursuivies sous plus fortes inductions (jusqu'à 15 T) et d'autres échantillons. Au-delà de 7 T, les mesures seront faites certainement à 4,2K. Cependant, une nouvelle canne expérimentale, en cours d'étude, est prévue pour des mesures à température variable sous inductions élevées.

Participants CNRS/Université : P. Pataud, P. Tixador