

# Analyses tomographiques de câbles supraconducteurs en conduit pour les réacteurs à fusion nucléaire : de l'image à la propriété physique

Romain BABOUCHE<sup>1,2\*</sup>, Jean-Luc DUCHATEAU<sup>1</sup>, Daniel DUMITRU<sup>3</sup>, Alexandre LOUZGUITI<sup>1</sup>, Mihail LUNGU<sup>3</sup>, Ion TISEANU<sup>3</sup>, Frederic TOPIN<sup>2</sup>, Bernard TURCK<sup>1</sup>, Louis ZANI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CEA, IRFM, F-13108 Saint-Paul-Lez-Durance, France.

<sup>2</sup>Aix-Marseille Univ, CNRS, IUSTI, Marseille, France.

<sup>3</sup>INFLPR, Magurele, Romania.

\* (auteur correspondant : [romain.babouche@cea.fr](mailto:romain.babouche@cea.fr))

**Résumé** - Les bobines de champ magnétique des réacteurs à fusion nucléaire sont, à l'heure actuelle, majoritairement construites à partir d'enroulements de grandes longueurs de câbles composés de centaines, voire de milliers, de brins supraconducteurs et de cuivre torsadés. Le but de la présente contribution est de présenter la méthode de traitement des données issues de la tomographie de rayons-X de ces câbles. Ces données sont utilisées dans le but d'établir le réseau électrique équivalent au câble et ainsi déterminer les résistivités de contact entre les différents éléments conducteurs de ce dernier ainsi que les conductivités effectives des multiples étages de torsades constituant cette structure.

## Nomenclature

$K$	<i>matrice des conductivités</i>	$I$	<i>courant entre deux éléments</i>
$R$	<i>résistance entre deux éléments</i>	$\rho_{ScSc}$	<i>résistivité inter brins supraconducteurs</i>
$X$	<i>tension ou courant</i>	$\rho_{ScCu}$	<i>résistivité inter brins supra/cuivre</i>
$B$	<i>termes sources et conditions aux limites</i>	$\rho_{CuCu}$	<i>résistivité inter brins de cuivre</i>
$U$	<i>tension entre deux éléments</i>	$\rho_b e_b$	<i>résistance individuelle de contact</i>

## 1. Introduction

L'une des pistes d'exploration pour la maîtrise de la fusion nucléaire comme source d'énergie est la fusion par confinement magnétique. Les aimants supraconducteurs sont la piste principale pour générer le champ magnétique nécessaire au confinement du plasma puisqu'ils permettent de réduire drastiquement la taille et la consommation électrique du réacteur appelé tokamak. Les bobines de champ magnétique sont, à l'heure actuelle, majoritairement construites à partir d'enroulements de grandes longueurs de câbles dont la géométrie résultante est complexe et a un impact direct sur les propriétés magnétiques, électriques et thermiques. Ces conducteurs sont appelés Câbles en Conduit (CICC).

Dans cet article nous présentons comment l'analyse par tomographie de rayons-X des câbles en conduit permet de déterminer, entre autre, des indicateurs géométriques et électriques pertinents dans le but de modéliser le comportement de l'aimant en opération. Cela nécessite, notamment, la caractérisation des sources de chaleur (effet Joule, radiations) et des échanges avec le fluide de refroidissement. Ici, nous présentons, les travaux relatifs à la détermination des résistivités de contact inter-brins indispensables pour la détermination des sources de chaleur dues à l'effet Joule. Cela suppose la connaissance préalable du réseau électrique (nombre, position et surface des contacts) du câble et l'outil de résolution associé pour extraire, d'une part, les résistivités de contact à partir de mesures de résistances entre les éléments

conducteurs du câble, et, d'autre part, calculer la répartition spatiale des courants au sein du câble et donc les sources par effet Joule. Ces données pourront par la suite servir d'entrée pour des modèles de pertes AC ou de thermo-hydraulique basés sur une approche réseau ou homogénéisée (i.e. comme paramètres effectifs).

## 2. Etude des câbles en conduit (CICC)

### 2.1. Propriétés et caractéristiques des CICC.

Les câbles en conduit (CICC) sont formés à partir de centaines, voire de milliers, de brins supraconducteurs et de brins de cuivre torsadés en multiplats successifs imbriqués pour former les étages du câble. Le câble ainsi formé est compacté dans une gaine (souvent en acier inoxydable) et forme ce que l'on appelle un conducteur [1]. La torsade des brins permet, d'une part, de les transposer, c'est-à-dire les exposer au même champ magnétique moyen et d'autre part, de réduire les pertes par couplage en diminuant le flux magnétique englobé et donc les boucles de courants induites.

Dans cet article, nous présentons un échantillon, appelé JT-60SA 3TP, du conducteur des bobines toroïdales (TF) du tokamak JT-60SA situé au Japon [2]. Cet échantillon est caractérisé par un taux de vide de 31.6 % et une longueur de 900 mm. Ses dimensions extérieures, en comptant sa gaine de 2 mm d'épaisseur, sont égales à 21.99 x 26.32 mm, voir Figure 2. L'échantillon JT-60SA 3TP est représentatif du conducteur utilisé pour réaliser les bobines du tokamak JT-60SA. Le câble est composé de 486 brins de 0.81 mm de diamètre dont 162 en cuivre pur et 324 d'un composite de filaments supraconducteurs (Nb-Ti) noyés dans une matrice de cuivre (cf. Figure 2 et 3). Le Tableau 1 présente les principales caractéristiques de ce câble [2]. Lors de sa fabrication, le toron de brins est enrubanné avec un feuillet en acier inoxydable (aussi appelé wrapping) d'une épaisseur de 0.2 mm pour faciliter son insertion dans la gaine.

Matériau supraconducteur	Nb-Ti
Nombre de brins	486 (324 Sc + 162 Cu)
Schéma de câblage	(2 Sc + 1 Cu) x 3 x 3 x 3 x 6

Tableau 1 : Principales caractéristiques du câble du conducteur JT-60SA TF.

En régime nominal, le courant est porté exclusivement par les brins supraconducteurs. Dans le cas d'une transition du matériau de l'état supraconducteur vers l'état résistif, ces brins deviennent de moins bons conducteurs que le cuivre et le courant est redistribué parmi la totalité des brins composant le câble. Le refroidissement des bobines toroïdales du tokamak JT-60SA est assuré par une circulation forcée d'hélium supercritique à une température d'environ 4 K à l'intérieur de la gaine. La subdivision du câble en brins permet, entre autre, de maximiser le périmètre mouillé par l'hélium et donc de favoriser l'extraction de l'énergie dissipée dans les bobines lors de l'opération de la machine.

### 2.2. Tomographie de rayons-X de CICC

Dans le cadre d'une collaboration entre le CEA Cadarache, et l'INFLPR (National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics), Bucarest (Roumanie), l'échantillon JT-60SA 3TP a été analysé par tomographie de rayons-X. Il s'agit d'une analyse non destructrice dont la source de rayons-X génère un faisceau incident d'une énergie maximale de 320 kV. Cette énergie est adaptée selon le type d'échantillon (dimensions, type et largeur de la gaine etc.) [3]. Une fois

le câble compacté dans la gaine, les trajectoires des brins sont complexes et impactent les caractéristiques physiques des bobines. L'analyse par tomographie permet de disposer des véritables trajectoires et représente ainsi une source fiable pour étudier les propriétés des câbles en conduit. L'analyse par tomographie crée un ensemble d'images 3D qui sont traitées et uniformisées (dimensions, contraste) pour produire des images 2D, appelées couches balayant la totalité de l'échantillon et présentées en Figure 1.

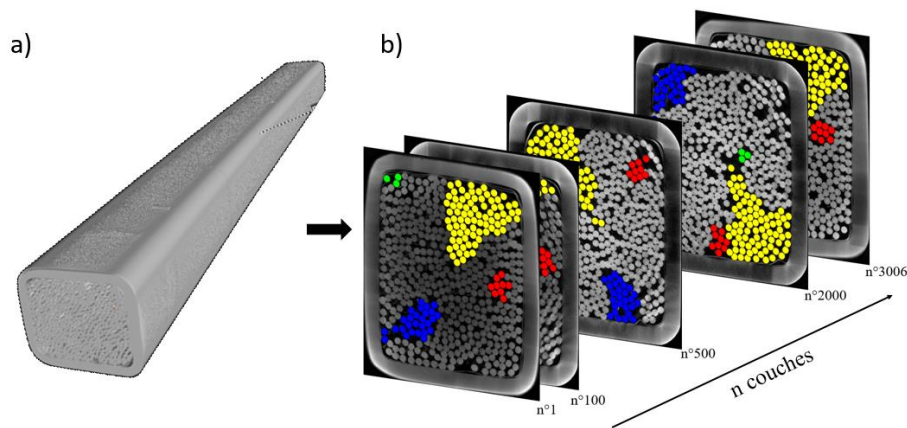


Figure 1 : a) volume de l'échantillon JT-60SA 3TP analysé par tomographie de rayons-X. b) couches, issues du volume analysé. Certains types d'étages sont identifiés pour illustration (1<sup>er</sup> étage en vert, 2<sup>e</sup> étage en rouge, 3<sup>e</sup> étage en bleu et 4<sup>e</sup> étage en jaune).

L'échantillon est analysé avec une résolution de voxels de  $29 \times 29 \times 114 \mu\text{m}$ . Cette résolution permet d'identifier chacun des 486 brins sur chaque couche (environ 30 voxels de diamètre). Le mouvement radial d'un brin entre une couche et la suivante est en moyenne d'environ 4% de son diamètre. Ainsi, du fait d'une résolution adaptée et du grand nombre de couches générées, tous les brins sont identifiés sur toute la longueur de l'échantillon et leurs trajectoires sont accessibles. Après traitement des images, il est possible d'obtenir des paramètres effectifs du câble dans le but de déterminer des propriétés physiques d'intérêt pour l'opération des bobines dans un environnement de tokamak.

### 3. Réseau électrique équivalent au câble

Dans cette partie nous traitons la génération du réseau électrique de l'échantillon. Ce réseau repose, d'une part, sur la connaissance précise des trajectoires des brins et, d'autre part, sur la connaissance préalable des différents étages du câble. Ces deux aspects sont obtenus grâce au développement d'un algorithme complet et dédié à l'étude des images tomographiques.

#### 3.1. Identification des étages

L'identification des étages des CICC est essentielle dans la mesure où la majorité des phénomènes physiques se déroulent à l'échelle des différentes torsades du câble. Le premier étage du câble correspond à un triplet de brins (i.e. deux brins supraconducteurs torsadés avec un brin de cuivre). Par la suite, trois triplets comme celui-ci sont torsadés ensemble pour former le deuxième étage : un triplet de triplets. Pour former le câble dans sa totalité, cette procédure est répétée en suivant le schéma de câblage présenté dans le Tableau 1.

La première étape majeure de l'analyse des images brutes issues de la tomographie est donc de reconstruire la trajectoire des brins individuels puis d'associer les brins à leurs étages respectifs. La méthode d'identification des étages est basée sur les distances inter-brins moyennées sur la longueur de l'échantillon. La procédure, itérative et décrite dans [4], consiste à associer les brins les plus proches pour constituer des triplets puis à éliminer les éventuels

triplets apparents redondants. Enfin, une étape de vérification des étages est conduite grâce à la nature des brins (chaque triplet est composé de 2 brins supraconducteurs et 1 brin de cuivre, cf. Tableau 1). La Figure 2 présente différentes vues de l'échantillon JT-60SA 3TP dont la colonne de droite superpose l'identification des différents étages sur l'image tomographique. Sur cette image, les triangles verts relient chacun trois brins formant un triplet. Ils sont au nombre de 162. Les triangles rouges relient trois triangles verts par leur centre de gravité. Il s'agit du deuxième étage du câble, des triplets de triplets au nombre de 54. Viennent ensuite les triangles bleus (18), jaunes (6) et l'hexagone blanc symbolisant respectivement le troisième, quatrième et cinquième étage du câble. Sur la Figure 1, les quatre premiers étages du câble sont identifiés par le même code couleur.

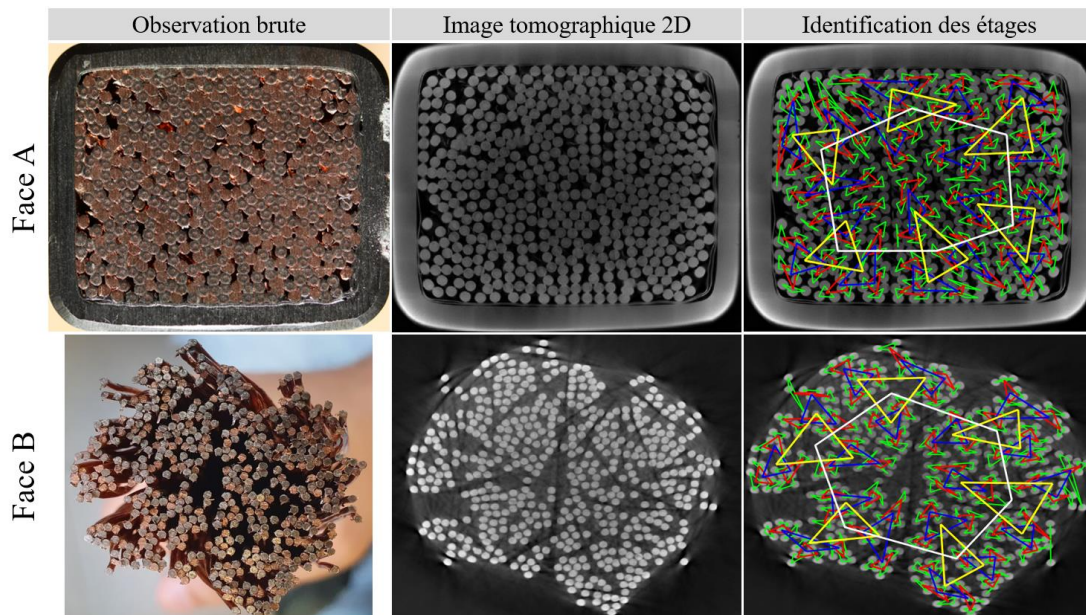


Figure 2 : (haut) Différentes vues de l'échantillon JT-60SA 3TP. De gauche à droite : photo de la face A de conducteur, image tomographique correspondante, superposition de l'identification des étages. (bas) Face B de l'échantillon, sans gaine ni wrapping.

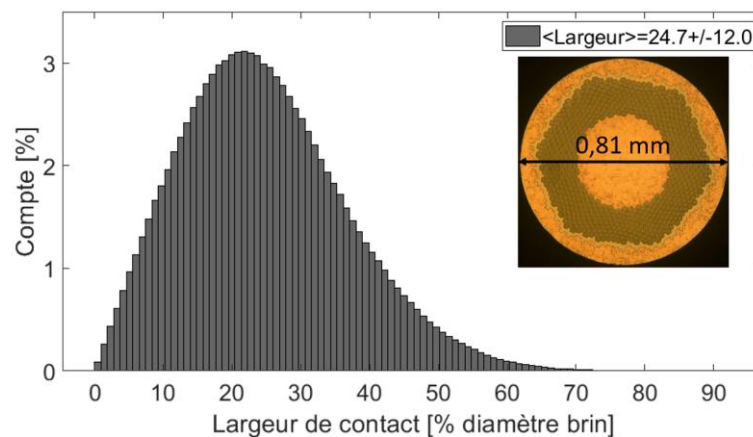


Figure 3 : Distribution des largeurs de pénétration normalisées au diamètre du brin. Insert : photo d'un brin supraconducteur.

### 3.2. Contacts inter-brins

L'analyse des câbles en conduit par tomographie de rayons-X permet une connaissance précise et fiables des trajectoires de chaque brin composant le câble.

En chaque couche, nous calculons toutes les distances inter-brins en prenant comme référence leur centre. Il y a contact entre deux brins lorsque ces distances sont inférieures ou égales au diamètre d'un brin. Lorsqu'un contact est identifié nous calculons sa largeur et sa longueur (i.e. le nombre de couches sur lesquelles ce contact est identifié). La Figure 3 présente la distribution des largeurs de contact inter-brins normalisée au diamètre de ces derniers. En réalité, les brins sont, soit, distant sans contact, soit, ils s'écrasent les uns contre les autres. La distribution est donc dissymétrique et bornée aux grandes valeurs par l'écrasement maximal de deux brins. L'étude des contacts est essentielle puisqu'ils dictent la conductance inter-brins. Plus un contact sera prononcé, plus la résistance associée sera faible.

### 3.3. Génération du réseau électrique

#### 3.3.1. Topologie du réseau électrique

Dans cette section, grâce à l'identification des étages du câble et des contacts inter-brins, nous détaillons la construction du réseau électrique équivalent au câble et sa topologie. Dans la suite, les "arrêtes" correspondent aux connexions entre les différents nœuds de ce réseau et les "brins" font référence aux brins physiques formant le câbles et visible en Figure 2.

L'échantillon JT-60SA 3TP est composé de  $N_{brins} = 486$  brins et long d'environ 900 mm correspondant à  $N_{couches} = 7896$  images tomographiques 2D. Dans le réseau électrique, chaque brin est discrétisé en  $N_{couches}$ . Ainsi le réseau à une taille égale à  $N_{couches} \times N_{brins} = 3\,837\,456$  nœuds. De plus, dans une couche donnée, chaque brin est lié à tous ses contacts par les arrêtes du réseau. Or, dans les câbles en conduit, les brins sont torsadés et assemblés en étages ce qui implique un grand nombre de contacts inter-brins (en moyenne, pour un brin, 5 contacts par couche et 80 brins différents touchés sur la longueur de l'échantillon). Il en résulte donc réseau électrique de grande taille (~15 millions d'arrêtes et de topologie complexe car de connectivité élevée).

#### 3.3.2. Définition des résistivités inter-brins

Chaque arrête du réseau est affectée d'une valeur de résistivité selon sa direction dans le câble et les matériaux qu'elle lie. Nous aurons 5 types d'arrêtes : longitudinale au sein d'un brin (cuivre ou supraconducteur), contact supraconducteur-supraconducteur, cuivre-supraconducteur et cuivre-cuivre. Dans le cas des contacts transverses, c'est-à-dire au sein d'une même couche, une arrête peut lier deux brins supraconducteurs. Dans ce cas elle sera affectée de la valeur  $\rho_{SCSC}$ . Lorsqu'elle lie deux brins de cuivre, la valeur de  $\rho_{CuCu}$  y sera affectée et enfin, la valeur de  $\rho_{SCCu}$  sera affecté à l'arrête si celle-ci lie un brin supraconducteur et un brin de cuivre. La résistivité transverse des brins est calculée à partir des surfaces de contact inter-brins et de la composition des brins comme le montre la Figure 4. Dans le cas des résistivités longitudinales, c'est-à-dire selon l'axe du câble, cette valeur est connue par le type de matériau. Elle est nulle (ou de valeur négligeable selon le traitement numérique) pour un brin supraconducteur et égale à  $\rho_{cu}L_{brin}/S_{brin}$  pour un brin de cuivre.

Bien que l'analyse des images tomographiques permettent de remonter aux surfaces de contact inter-brins, nous ne pouvons pas déterminer la valeur de la résistivité individuelle de contact inter-brins, notée  $R_{cont}$  dans la Figure 4. Cette dernière traduit la qualité de contact entre deux brins et est inconnue a priori. Nous ajusterons sa valeur à l'aide de mesures de résistance inter-brins que nous détaillons plus bas.

Notons que, du fait de la présence de brins supraconducteurs dans le câble, deux topologies de réseaux peuvent être créées. La première correspond à la méthode usuelle, les

brins supraconducteurs sont décimés en un seul point puisque leur résistivité longitudinale est nulle. La taille du réseau présenté plus haut est ainsi réduite à 1 279 476 nœuds. Cependant, cette méthode complexifie l'indilage des éléments constituant le réseau. La seconde correspond à la méthode décrite en partie 3.3.1 et celle que nous utilisons dans ce travail. Chaque brin est discrétisé en  $N$  points. Cela permet d'utiliser également ce réseau pour des applications variées (transition résistive localisée du matériaux supraconducteur) mais au détriment de sa taille.

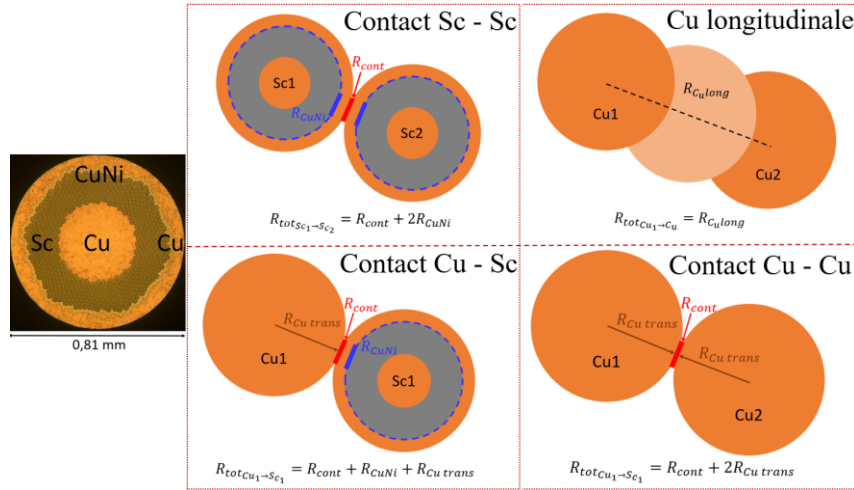


Figure 4 : Schémas de principe du calcul des résistivités inter-brins.

### 3.3.3. Construction de la matrice des conductances du réseau

La détermination de la résistance entre deux points quelconques du réseau revient à résoudre le système suivant avec une tension imposée  $U_1$  au point n°1 et un courant  $I$  au point n°2.

$$[K]\{X\} = \{B\} \quad (1)$$

avec,  $[K]$  la matrice carrée de conductivité du réseau électrique,  $\{X\}$  un vecteur colonne des inconnues, ici la tension en tout point du réseau, et  $\{B\}$  un vecteur colonne contenant les termes sources et les conditions aux limites.  $[K]$  est une matrice de grande taille (i.e. taille du réseau au carré, ici  $1.47 \times 10^{13}$  éléments) et très creuse puisque 99,99989% des termes sont nuls. La résolution efficace de ce système implique l'utilisation d'algorithmes d'inversions adaptés aux matrices creuses. De plus nous procédons aux cartographies de résistances entre brins et entre multipléts ce qui, in fine, implique de résoudre le système plusieurs centaines de milliers de fois.

La tension au point n°2, notée  $U_2$  est déterminée à l'aide de l'équation (1) et la résistance entre les points 1 et 2 est donnée par

$$R_{1 \rightarrow 2} = \frac{\Delta U}{I} = \frac{U_2 - U_1}{I} \quad (2)$$

La même méthode peut être utilisée avec plus de deux points en imposant soit des courants ou des tensions aux nœuds choisis. Pour deux tensions imposées, on utilisera la loi des nœuds et des mailles au point considéré pour déterminer  $I$ .

Ce calcul est utilisé pour préparer une campagne expérimentale dont l'objectif est d'extraire la résistivité individuelle de contact inter-brins,  $R_{cont}$  (cf. Figure 4). Ces mesures se déroulent dans le cadre d'une collaboration en le CEA Cadarache et l'Université de Twente, Enschede (Pays-Bas). Nous effectuerons ces mesures sur l'échantillons JT-60SA 3TP dont nous disposons de la tomographie et du réseau électrique équivalent. La configuration de la station d'essais nous contraint d'effectuer les mesures de résistances inter-brins à partir d'une seule

face de l'échantillon. C'est donc à partir de la face B, qui a été préparée en conséquence (suppression de la gaine et du wrapping sur 100 mm), que nous les réaliserons (cf. Figure 2). L'expérience qui se déroule à froid, avec l'échantillon plongé dans un bain d'hélium liquide à 4,2 K, suppose de limiter les pertes thermiques dues aux connexions électriques. C'est donc dans ce but que nous réalisons des simulations via le réseau électrique équivalent de l'échantillon pour optimiser le choix et le nombre des combinaisons de mesures. L'objectif est de maximiser le nombre de connexions et de comparer les valeurs de résistivités inter-étages avec celles du premier étage. Dans un second temps, les valeurs de la résistivité individuelle de contact seront identifiées sur la base de la comparaison paramétrée entre les valeurs mesurées et calculées. Le choix des combinaisons de brins retenus permettra de vérifier non seulement la valeur moyenne de ce paramètre mais aussi les éventuelles disparités entre les contacts intra-étage ou inter-étages.

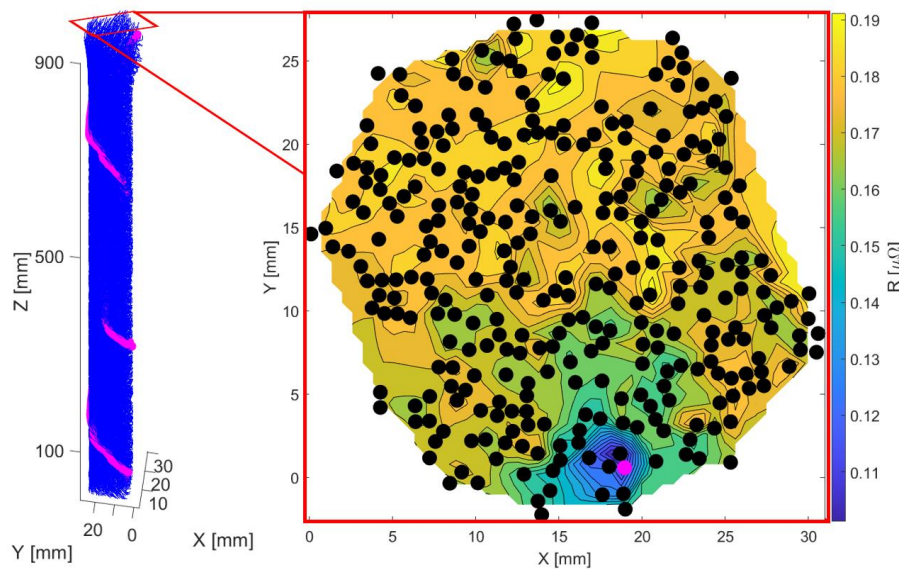


Figure 5 : (Gauche) reconstruction des brins supraconducteurs de l'échantillon JT-60SA 3TP. (Droite) cartographie des paires de résistances entre le brin n°6 (en magenta) et tous les autres brins supraconducteurs (en noir).

### 3.3.4. Cartographies de résistances inter-brins

Dans cette partie, nous présentons un exemple de résolution du système avec les conditions aux limites (i.e. potentiel et flux) imposées sur la même face pour correspondre au dispositif expérimental. La Figure 5 présente la cartographie des résistances entre le brin n°6 et tous les autres brins supraconducteurs (323 résolutions du système). L'effet de la distance sur la valeur de la résistance est clairement visible. Le voisinage du brin n°6 est une zone de faible résistance,  $[0.10 ; 0.13] \mu\Omega$ , puisque les contacts entre ce brin et ses voisins sont importants. A l'inverse, la valeur de la résistance augmente avec la distance séparant une paire de brins donnée. En effet, la traversée du réseau implique un nombre croissant de contacts (en série et parallèle) avec la distance séparant les brins. L'ordre de grandeur des résistances calculées est faible et est cohérent avec les attentes et les mesures antérieures sur ce type de CICC. La technologie des câbles en conduit cherche à redistribuer les courants entre les brins le plus efficacement possible et à minimiser les résistances transverses et longitudinales (hors état supraconducteur).

Le réseau établi plus haut permet d'imposer les conditions aux limites de manière arbitraire sur des nœuds quelconques du réseau. Associé à la connaissance des différents étages du câble, cela permet de modéliser une situation quelconque d'opération ou une configuration

de mesures spécifique, en particulier, déterminer les résistivités entre les différentes torsades du câble.

Les valeurs de résistances calculées via ce réseau comportent une incertitude qui est liée, d'une part, à la géométrie du câble issue de la tomographie (diamètre d'un brin estimé à la résolution d'un pixel près entraînant des erreurs sur les largeurs et épaisseurs de contacts), d'autre part, une incertitude intrinsèque aux propriétés des matériaux composant le câble et enfin, aux erreurs numériques. Une estimation claire de ces incertitudes sera établies grâce aux données expérimentales.

## 4. Conclusion

Nous avons présenté la méthode d'analyse des données 3D issues de la tomographie de rayons-X des câbles en conduit. Nous disposons ainsi des véritables trajectoires des brins qui se révèlent complexes ainsi que de la distribution des contacts inter-brins et de leur surface associée. Enfin, connaissant les distances inter-brins en chaque point de l'échantillon, nous identifions les différents étages qui composent le câble. L'association, de ces derniers avec les statistiques de contacts permet de générer le réseau électrique équivalent du câble et se placer en tous points et toutes échelles. Nous donnons un exemple de résolution du réseau électrique pour les paires de brins supraconducteurs. Pour une paire de brins donnée, la résistance augmente avec la distance séparant ces brins. Nous confronterons les simulations réalisées à l'aide du réseau électrique à des mesures de résistance inter-brins et inter-étages actuellement en cours. Enfin, nous prévoyons d'utiliser les résultats de ces mesures comme paramètres d'entrée du modèle COLISEUM qui vise à prédire les pertes par couplages d'un câble en conduit à différentes échelles.

## Références

- [1] P. Bruzzone, «30 Years of Conductors for Fusion: A Summary and Perspectives,» *IEEE Transaction On Applied Superconductivity*, vol. 16, n° %12, 2006.
- [2] L. Zani, P. Barabaschi et M. Peyrot, «Starting EU Production of Strand and Conductor,» *IEEE Transaction on Applied Superconductivity*, vol. 22, n° %13, 2012.
- [3] I. Tiseanu, «Multi-scale 3D modelling of a DEMO prototype cable from strand to full-size conductor based on X-ray tomography and image analysis,» *Fusion Engineering and Design*, vol. 146, pp. 568-573, 2019.
- [4] R. Babouche, L. Zani, A. Louzguiti, B. Turck, J. Duchateau et F. Topin, «Analytical Modeling of Coupling Losses in CICC, Extensive Study of the COLISEUM Model,» *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 32, n° %16, pp. 1-5, 2022.

## Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'entreprise ASSYSTEM et M. Slim Constant pour leur soutien financier et technique. Nous remercions également M. Jiolat pour son aide à la préparation de l'échantillon.