Science Arts & Métiers (SAM)

is an open access repository that collects the work of Arts et Métiers Institute of Technology researchers and makes it freely available over the web where possible.

This is an author-deposited version published in: https://sam.ensam.eu
Handle ID: .http://hdl.handle.net/10985/9820

To cite this version :

Raphaël MOULART, René ROTINAT, François NUNIO, Pierre VEDRINE - Identification des propriétés mécaniques d'enroulements supraconducteurs d'un aimant d'IRM - In: Congrès Français de Mécanique (CFM 2015), France, 2015-08 - CFM 2015 - 2015

Any correspondence concerning this service should be sent to the repository Administrator : scienceouverte@ensam.eu

Arts et Métiers Institute of Technology

Identification des propriétés mécaniques d'enroulements supraconducteurs d'un aimant d'IRM

R. MOULART[a], R. ROTINAT[b], F. NUNIO[c], P. VEDRINE[d] a. Laboratoire « MSMP » (Mechanics Surfaces and Materials Processing) – Arts et Métiers ParisTech – Rue Saint Dominique BP 508 – 51006 Châlons-en-Champagne – FRANCE - Raphael.Moulart@ensam.eu
b. Laboratoire « MSMP » (Mechanics Surfaces and Materials Processing) Arts et Métiers ParisTech – Rue Saint Dominique BP 508 – 51006 Châlons-en-Champagne – FRANCE - Rene.Rotinat@ensam.eu
c. DSM/IRFU/SIS/LCAP - CEA - Bâtiment 123 - 91191 Gif-sur-Yvette – FRANCE - francois.nunio@cea.fr
d. DSM/IRFU/SIS/LCAP - CEA - Bâtiment 123 - 91191 Gif-sur-Yvette – FRANCE - pierre.vedrine@cea.fr

Résumé : (16 gras)

Cette étude propose une méthodologie expérimentale afin d'identifier les propriétés mécanique élastiques d'anneaux supraconducteurs. Des essais de traction diamétrale associés à une technique de mesure champs de déplacements ont été effectués sur des échantillons. Les champs de déformations ont ensuite été obtenus à partir des champs de déplacements par différentiation numérique. Enfin, les quatre modules élastiques orthotropes dans le plan des enroulements ont été identifiées à l'aide la méthode des champs virtuels.

Abstract : (16 gras)

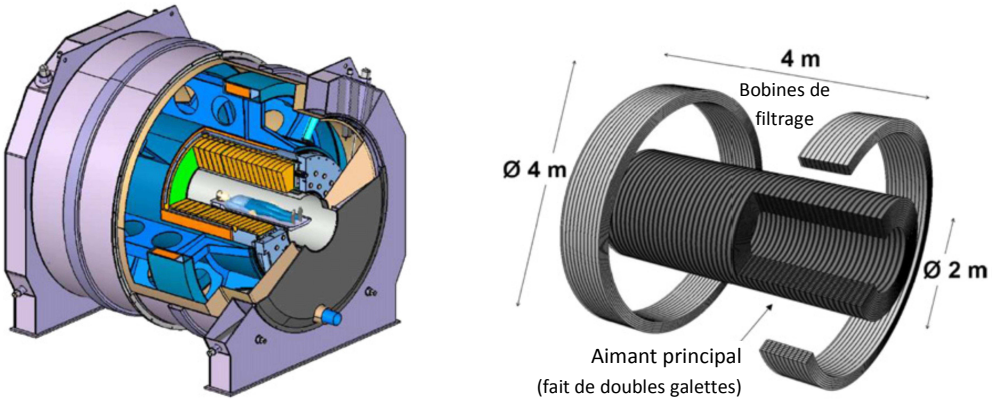
This study deals with an experimental methodology developed in order to identify the elastic properties of superconducting ring-shaped windings. Mechanical tensile tests were conducted on specimens associated to a full-field displacement measurement technique. Strain fields were then obtained from the measured displacement fields by numerical differentiation. Finally, the four in-plane orthotropic stiffnesses of the windings were determined using the Virtual Fields Method

Mots clefs : Mesures de champs cinématiques ; élasticité orthotrope ; matériau supraconcteur ; IRM ; méthode des champs virtuels

1 Introduction

Le projet franco-allemand Iseult/INUMAC a pour objectif de développer un dispositif d'imagenrie par résonance magnétique (IRM) 11,7 T permettant une inspection de l'ensemble d'un corps humain

(Fig. 1). Ce dispositif présentera une sensibilité, des résolutions spatiale, temporelle et spectrale bien meilleures que les IRM précliniques et cliniques actuels [1]. L'aimant principal de cet IRM est constitué d'un empilage de « double galettes » constituées de deux couches d'enroulements de matériaux supraconducteurs reliées par une zone de transition (Fig. 2).



(a) Vue d'ensemble (b) Aimant principal

FIGURE 1 – IRM Iseult de 11,7 T.

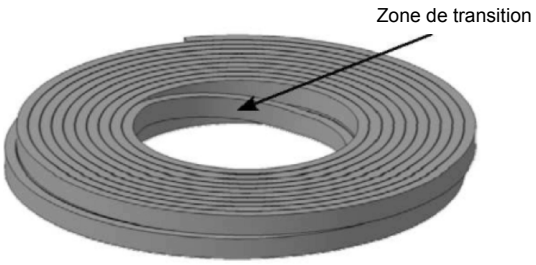


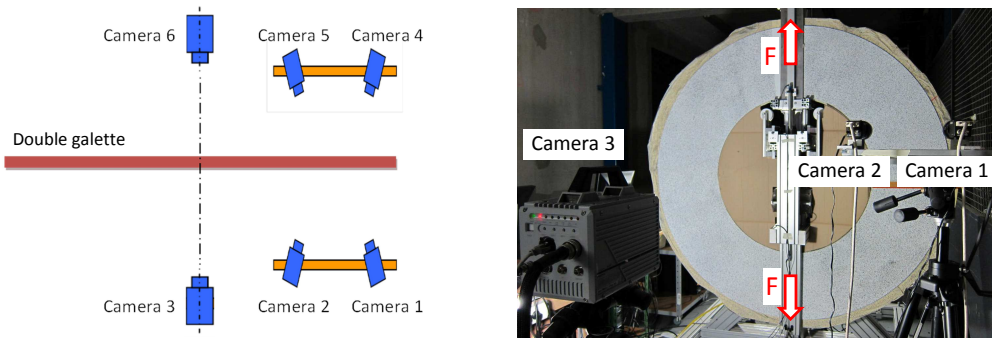
FIGURE 2 – Géométrie d'une « double galette »

Des câbles conducteurs composites en Cuivre/NbTi sont enroulés en 2×88 tours pour constituer chaque « double galette ». Un composite isolant verre/époxy assure la cohésion de l'ensemble en collant les câbles de chacun des tours entre eux. Une plaque en composite verre/époxy est insérée entre les deux couches pour des raison d'isolation électrique.

L'objectif de ce travail est d'identifier les composantes des rigidités élastiques orthotropes équivalentes pour cette structure complexe. Les propriétés mécaniques de telles bobines supraconductrices sont habituellement obtenues à partir de tests mécaniques utilisant des techniques de mesure locales [2]. Cependant, ces techniques sont mal adaptées à l'étude des matériaux ou structures anisotropes. Par conséquent, pour cette étude, une approche inverse associée à des mesures de champs cinématiques a été mise en place. Dans un travail antérieur, une méthodologie générale basée sur l'utilisation de la méthode des champs virtuels (MCV) pour identifier les rigidités de tubes composites épais obtenus par enroulement filamentaire a été mise au point [3]. Cette dernière a été ensuite adaptée et appliquée à des « doubles galettes » à une échelle réduite (2×20 tours) [4]. Ici, la méthodologie est appliquée aux « doubles galettes » réelles.

2 Méthodologie

Le test mécanique réalisé sur les « doubles galettes » est un essai de traction diamétrale. Un actionneur applique une force en deux points diamétralement opposés du rayon intérieur de la « double galette » conduisant à un état de contrainte mixte de traction-flexion. Le montage expérimental est représenté figure 3. Un ensemble de six caméras CCD (trois de chaque côté), a été utilisé pour mesurer la cinématique de la « double galette » sur les deux côtés simultanément à l'aide d'une technique de corrélation d'images numériques.



(a) Schéma – vue de dessus (b) Photographie du montage

FIGURE 3 – Dispositif expérimental.

De chaque côté, deux caméras suivent les déplacements plans et hors-plan d'une zone limitée de la surface (un secteur angulaire d'environ 30°) afin d'extraire des rigidités (Fig. 4) et une troisième caméra observe l'intégralité de la surface afin de pouvoir détecter à l'aide des champs de déplacements plans une éventuelle occurrence d'un délaminage.

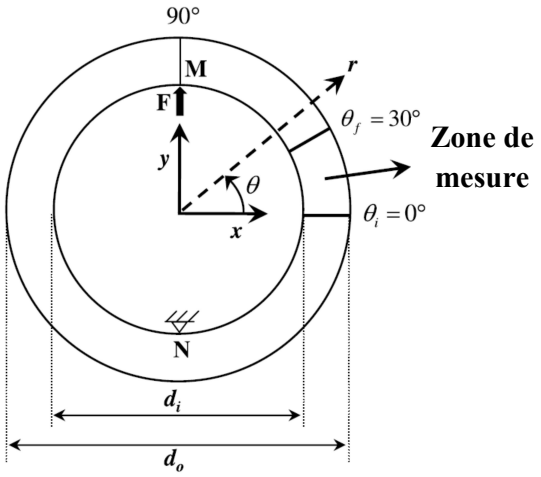


FIGURE 4 – Zone de mesure utile pour l'identification des propriétés mécaniques.

Pour utiliser la corrélation d'images, il est nécessaire de marquer la surface étudiée par un motif aléatoire (un « mouchetis »). Ici, pour conserver la même résolution spatiale de chaque coté de la « double galette », les deux mouchetis réalisés devaient présenter les mêmes propriétés (même tailles moyennes des « taches » noires sur le fond blanc).

3 Résultats

Le traitement des images enregistrées lors des essais mécaniques a été réalisé en utilisant le logiciel de stéréo-corrélation VIC3D. L'étalonnage a été réalisé sur chaque face [5]. L'étude préliminaire [4] a révélé que, du fait de la structure complexe des enroulements, de la flexion hors-plan se produit lorsque ceux-ci sont soumis à la traction diamétrale. Il est donc nécessaire pour identifier des rigidités d'annuler cet effet de flexion ce qui est obtenu en faisant la moyenne de champs de déformations entre les deux faces de la « double galette » (on supprime ainsi la composante de flexion des champs de déformations et seuls la composante plane est conservée). Ces champs de déformations moyennes sont ensuite traités par la méthode des champs virtuels (MCV) qui, à partir de l'écriture de l'équilibre statique global du solide, permet d'extraire les rigidités [6]. Les moyennes des valeurs identifiées sont répertoriées Tab. 1. L'identification des $E_{\theta\theta}$, G_{ss} et $\nu_{\theta r}$ est raisonnablement stable. Un plus grand écart est observé pour E_{rr} ce qui s'explique par le fait que cette rigidité est liée à la déformation radiale qui est très faible (peu sollicitée par traction diamétrale dans cette zone angulaire). Néanmoins, à partir des valeurs des rigidités individuelles des constituants de la structure (supraconducteur, verre/époxy assurant la cohésion et l'isolement), de leur fraction volumique et à l'aide d'une simple loi des mélanges, des valeurs de référence peuvent être déterminées (Tab. 1) et il est à noter que les résultats expérimentaux sont en bon accord avec ces valeurs de référence.

TABLE 1 – Résultats de l'identification des modules orthotropes par la MCV et valeurs de référence (à partir d'une loi des mélanges).

Modules	Valeurs identifiés	Valeurs de référence
E_{rr} (GPa)	86,7	82
$E_{\theta\theta}$ (GPa)	116,7	115
G_{ss} (GPa)	21,3	29
$\nu_{\theta r}$	0,38	0,36

Par ailleurs, l'observation de l'intégralité de la surface des double-galettes (par les caméras 3 et 6 de la figure 3(a)) a pour but de révéler l'occurrence du délaminage. Si la caméra 3 a rempli sa mission, la caméra 6 ne présentait pas une résolution suffisante pour révéler le délaminage (Observation du délaminage par la caméra 3 : Fig. 5).

En revanche, pour un des essais réalisés, le délaminage a été révélé pour des valeurs d'efforts relativement faibles par rapport à ce qui était escompté dans la zone 0-30° utilisée pour l'identification par les caméras 1, 2 et 4, 5.On observe alors un premier délaminage sur une face dès une valeur d'effort d'une centaine de kN. Pour cette même structure et pour un effort de 175 kN, les deux faces présentent un délaminage important, la structure est complètement ruinée (Fig. 6).

Ces ruptures précoces semblent provenir d'une dispersion lors de la fabrication des double-galettes : les précontraintes appliquées ne sont pas homogènes dans l'enroulement entrainant une polymérisation plus ou moins complète de la résine époxyde assurant la cohésion et l'isolement des brins de supraconducteur.

4 Conclusion

En conclusion, la méthodologie proposée associant les mesures de champs cinématiques à une procédure inverse (la MCV) permet d'identifier les modules élastiques orthotropes globaux des « doubles galettes »

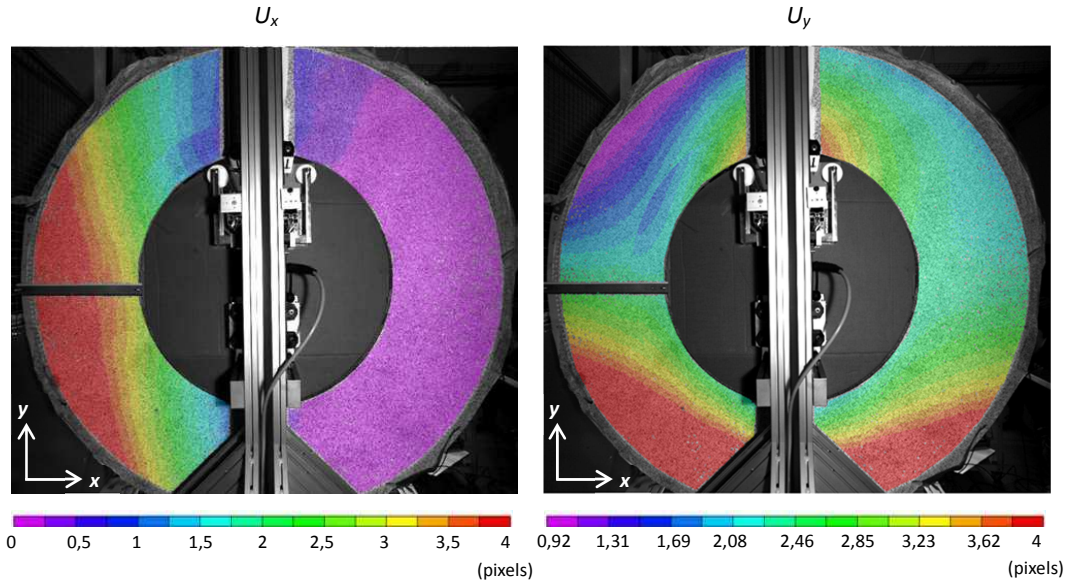


FIGURE 5 – Observation des cartes de déplacements par la caméra 3 pour un effort de 192 kN ; mise en évidence d'un délaminage sur la face observée.

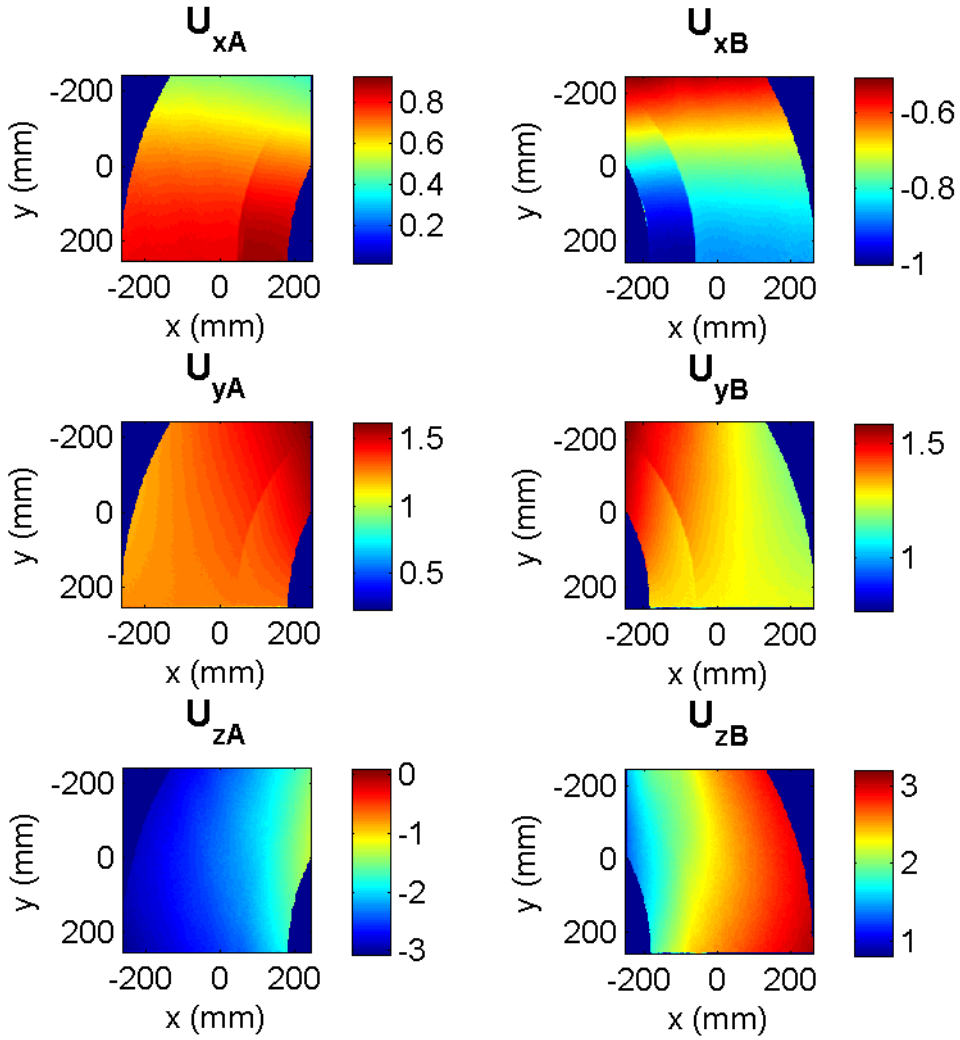


FIGURE 6 – Observation des cartes de déplacements par les caméras 1, 2 et 4, 5 pour un effort de 175 kN ; délaminage important sur les deux faces de la double galette.

à échelle réelle qui constitueront la bobine formant l'aimant principal de l'IRM Iseult/INUMAC 11,7 T. Le dispositif développé permet également de contrôler simultanément l'apparition de délaminage au cours de l'essai.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier M. Cédric Person pour son assistance technique dans la réalisation des essais mécaniques instrumentés sur les « doubles galettes ».

Références

[1] P. Vedrine, G. Aubert, F. Beaudet, J. Belorgey, C. Berriaud, P. Bredy, A. Donati, O. Dubois, G. Gilgrass, F.P. Juster, C. Meuris, F. Molinie, F. Nunio, A. Payn, T. Schild, L. Scola, and A Sinanna. Iseult/inumac whole body 11.7 t mri magnet status.

[2] I.R. Dixon, R.P. Walsh, W.D. Markiewicz, and C.A. Swenson. Mechanical properties of epoxy impregnated superconducting solenoids. *IEEE Transactions on Magnetics*, 32(4) :2917–2920, 1996.

[3] R Moulart, S. Avril, and F. Pierron. Identification of the through-thickness rigidities of a thick laminated composite tube. *Composites Part A*, 37(2) :326–336, 2006.

[4] J.-H. Kim, F. Nunio, F. Pierron, and P. Vedrine. Characterizing elastic properties of superconducting windings by simulations and experiments. *Superconductor Science and Technology*, 24(12) :125001, 1996.

[5] F. Amiot, M. Bornert, P. Doumalin, J.-C. Dupré, M. Fazzini, J.-J. Orteu, C. Poilâne, L. Robert, R. Rotinat, E. Toussaint, B. Wattrisse, and J.-S. Wienin. Assessment of digital image correlation measurement accuracy in the ultimate error regime : Main results of a collaborative benchmark. *Strain*, 49(6) :483–496, 2013.

[6] M. Grédiac, F. Pierron, S. Avril, and E. Toussaint. The virtual fields method for extracting constitutive parameters from full-field measurements : a review. *Strain*, 42(4) :233–253, 2006.