

Refroidissement De Structures Mécaniques Et Coefficient De Transfert Thermique Dans Un Câble En Conduit A Température Cryogénique

Florent GAUTHIER¹, Frédéric TOPIN¹, Benoit LACROIX², Christine HOA³

¹Université d'Aix-Marseille – Laboratoire du CNRS IUSTI, UMR 6595, 5 Rue Enrico Fermi, Marseille, 13453, France

²CEA, IRFM, F-13108 Saint-Paul-lez-Durance, France

³CEA, INAC, SBT, F-38054 Grenoble, France

Résumé - Les principaux systèmes magnétiques du tokamak (réacteur de fusion à confinement magnétique) ITER sont refroidis par une circulation forcée d'hélium supercritique à environ 4,5 K et 5 bars. Les dix-huit électroaimants créant le champ magnétique dans la direction toroïdale de la machine (bobines TF) sont un des composants majeurs du système magnétique du tokamak en construction à St Paul lez Durance (France). Une bobine TF est constituée de supraconducteurs basés sur la technologie des câbles en conduit. Ces câbles se composent de brins supraconducteurs en niobium-étain (Nb_3Sn) transportant le courant générant une partie du champ magnétique de confinement du plasma et de deux circuits d'hélium en parallèle : le canal central, délimité par une spirale partiellement ouverte, et la zone annulaire contenant les brins supraconducteurs. Ces éléments sont insérés dans une gaine d'acier permettant le maintien de l'intégrité du câble. Le transfert thermique via un coefficient d'échange entre l'hélium de la région annulaire et la gaine et ses structures environnantes ainsi que le couplage thermique des tubes de refroidissement des boîtiers (structures mécaniques) des bobines TF représentent un enjeu majeur pour la description du comportement thermique des bobines. Une étude approfondie du couplage thermique entre le tube de refroidissement et le boîtier par un collage à l'aide d'une résine sera présentée. Elle fera intervenir l'importance de la connaissance des propriétés thermiques des matériaux mis en jeu à basse température ainsi que la contribution des éventuelles résistances thermiques aux interfaces. Le couplage de la gaine et de l'hélium de la région annulaire sera également présenté.

Introduction

Le projet ITER [01], actuellement en construction sur le site de Cadarache (France), est un projet visant à démontrer que la fusion nucléaire peut être utilisée pour produire de l'électricité à grande échelle. La fusion nucléaire consiste à faire entrer en collision des noyaux d'hydrogène dans un plasma (gaz ionisé) afin que leur fusion dégage de l'énergie. Le concept de machine de fusion retenu pour le projet ITER est le tokamak, du russe « chambre toroïdale avec bobines magnétiques ». Ces bobines magnétiques, ou électroaimants, sont utilisées pour créer de puissants champs magnétiques (supérieur à 10 T, soit 10 fois plus qu'un champ magnétique qu'une machine d'IRM) afin de confiner le plasma dans un volume clos. Pour réaliser de tels champs magnétiques, les électroaimants sont fabriqués avec des composites supraconducteurs. Ces matériaux ont la propriété de ne posséder aucune résistance électrique (donc pas de dissipation de chaleur par effet joule) sous certaines conditions, notamment de température.

Afin de faire fonctionner ces aimants dans des conditions optimales, leur refroidissement est assuré par une circulation d'hélium supercritique à 4.5 K, 5 bars (- 268.7 °C). A température cryogénique, le comportement thermique de la plupart des matériaux diffère de ce que l'on peut observer à température ambiante. En effet, si l'on considère par exemple deux matériaux usuels, un acier inox 316 et un isolant type fibre de verre-époxy, les temps caractéristiques de diffusion varient fortement entre 20 °C et -268.7 °C : la diffusivité thermique de l'acier à 300 K est d'environ de 4.0 mm².s alors qu'à 4 K elle est de 17.4 mm².s soit plus de quatre fois supérieure. De même, pour l'isolant, la

diffusivité thermique à 300 K est de $0.3 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}$ mais elle est de $28.7 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}$ à 4 K, soit quasiment un facteur 100.

Les conducteurs de type câbles-en-conduit (en anglais, câble-in-conduit conducteur [CICC]) se composent de deux canaux hydrauliques, le canal central délimité par une spirale, et la région annulaire. C'est également dans cette région annulaire que les composites supraconducteurs sont installés et sont en contact direct avec l'hélium qui assure leur refroidissement.



Figure 1 : bobine TF et son conducteur

Le tokamak ITER se compose de quatre groupes distincts d'électroaimants supraconducteurs :

- Le solénoïde central (CS), environ 950 tonnes,
- Les bobines de champ poloidal (PF), environ 2040 tonnes,
- Les bobines de correction de champ magnétique (CC), environ 190 tonnes,
- Les bobines de champ toroïdal (TF), environ 6080 tonnes (voir figure 1).

Le refroidissement des structures mécaniques ainsi que le coefficient de transfert thermique dans un câble est présenté ci-après sur l'exemple du conducteur TF.

Les outils numériques disponibles permettent d'estimer les ordres de grandeurs des aspects thermo-hydrauliques, mais la fabrication et l'opération des différents composants imposent une vérification expérimentale des différents comportements, y compris les couplages thermiques. Réaliser des tests en conditions cryogéniques nécessite une installation spécifique : une installation réfrigérante afin de fournir l'hélium supercritique, une chambre à vide, ainsi qu'une instrumentation dédiée et calibrée pour la plage de fonctionnement considérée. De plus, les temps de refroidissement mis en jeu sont de l'ordre de plusieurs jours afin d'obtenir les conditions d'opérations. Ces différentes contraintes renforcent l'intérêt d'utiliser des modèles afin de concevoir et valider ce type de composants. C'est également pour cette raison que conforter les données d'entrée (coefficients d'échange et résistance thermique) représente un point essentiel pour cette démarche globale.

Dans le but de vérifier expérimentalement l'efficacité thermique du réseau de refroidissement ainsi que le couplage thermique entre les conducteurs et la structure environnante en acier, une maquette intégrée a été conçue et fabriquée (dénommée par la suite maquette #1).

Une deuxième maquette (dénommée par la suite maquette #2) a été conçue afin d'étudier le coefficient d'échange entre l'hélium de la région annulaire et la gaine en acier.

Ces deux maquettes ont été testées lors de la même campagne de test qui a eu lieu en Mai 2015 au CEA de Grenoble, dans l'installation nommée "Helium Loop for hIgh lOad Smoothing" (HELIOS) [02].

Refroidissement des structures mécaniques : un enjeu pour les performances de la machine

Les bobines TF ne sont pas, contrairement aux autres aimants d'ITER, des bobines pulsées. Elles fonctionnent avec un courant constant de 68 kA par conducteur. Ces aimants ne doivent être déchargés que dans certaines conditions (perte de l'état supraconducteur par exemple). Le dimensionnement de la bobine prévoit en particulier un évènement très énergétique qui ne doit absolument pas mener à la décharge de ces aimants : lors d'une disruption du plasma (perte de l'équilibre plasma impliquant de fortes variations de champ magnétique), les aimants CS, PF et CC sont rapidement déchargés (~10 s). Cette succession de variations rapides de courants (et des champs magnétiques associés) génère des dépôts de chaleur importants dans les aimants, en particuliers dans les aimants TF :

- Un dépôt très local tout d'abord dans les conducteurs eux même (pertes AC);
- Un dépôt dans les structures en acier environnant les conducteurs (courants de Foucault).

C'est ce dernier dépôt qu'il faut absolument limiter : le système de refroidissement doit permettre de limiter l'apport de chaleur sur la première rangée de conducteur, en contact thermique avec la structure mécanique donc plus exposée au transfert de chaleur, afin d'éviter qu'elle ne s'échauffe excessivement et passe de l'état supraconducteur à l'état résistif.

Sachant que le refroidissement de la structure requière environ 20 kilomètres de tubes pour toutes les bobines TF, ce couplage est un enjeu principal pour l'extraction de la chaleur qui sera générée lors du fonctionnement de la machine. Comme plusieurs couches de matériaux isolants sont présentes entre le boîtier et le bobinage, une résistance thermique significative est présente entre la source de chaleur (partie du boîtier en rouge sur la figure 2) et la première rangée de conducteurs, mais un refroidissement actif est tout de même nécessaire afin de réaliser un écrantage efficace de la charge thermique. Une proposition serait d'assurer le couplage thermique des tubes de refroidissement à l'aide d'une résine chargée (pour une conductivité thermique améliorée).

Malgré une géométrie simple (tube cylindrique dans une rainure carrée), une maquette intégrée inédite (voir figure 3) a été fabriquée avec les matériaux prévus pour la bobine TF et avec les dimensions caractéristiques suivantes : largeur de 40 mm (périodicité des tubes de refroidissement) et longueur de 1 m compte tenu de l'espace disponible dans l'installation de test. Seuls les efforts mécaniques n'ont pas été considérés ni reproduits lors de ces études.

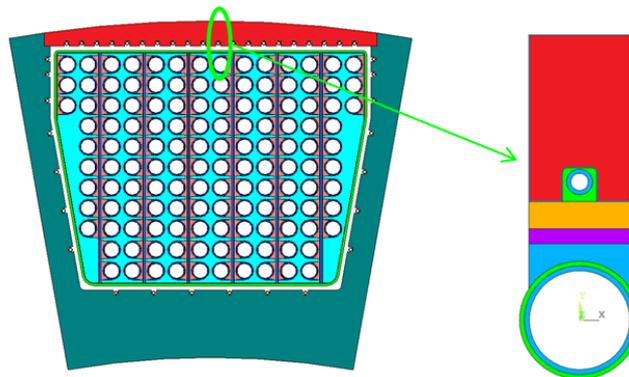


Figure 2 : coupe transverse d'une bobine TF et détail du tube de refroidissement



Figure 3 : vue de la maquette #1 testée au CEA de Grenoble sur l'installation HELIOS

Coefficient de transfert de la gaine à la région annulaire : un coefficient de transfert global

Dans la littérature existante, plusieurs travaux portent sur le couplage thermique entre les deux canaux du CICC [03-04], ou encore entre les brins et l'hélium. Cependant, le coefficient de transfert entre l'hélium de la région annulaire et la gaine en acier du conducteur reste un paramètre peu étudié et assez incertain. En effet, la fabrication du conducteur requiert d'enrubanner les brins supraconducteurs (voir Figure 1), d'où la présence de rubans métalliques (généralement en acier inox) entre la zone annulaire et la gaine, qui peuvent dégrader le couplage thermique correspondant. En effet, le transfert de chaleur entre la partie annulaire n'est pas simple : il se décompose en deux modes de transfert en parallèle :

- Un mode de convection entre l'hélium de la région annulaire et la gaine ;
- Un mode de conduction entre la gaine et le câble via les différents contacts dus aux rubans du câble puis une convection du câble vers l'hélium ;

Une maquette (voir figure 4) visant une mesure intégrée a donc été conçue et réalisée. Deux manchons en cuivre équipés de résistances chauffantes sur leur paroi externe ont été brasés sur la gaine. Des simulations par élément finis ont montré que la réponse en température d'un tel manchon soumis à une puissance surfacique présente d'une part une bonne sensibilité au couplage thermique entre la gaine et la zone annulaire, et d'autre part une très grande homogénéité dans le volume du manchon.



Figure 4 : Vue de la maquette #2 testée au CEA de Grenoble sur l'installation HELIOS

Campagne de test HELIOS : caractérisation des maquettes

La caractérisation des deux maquettes précédemment décrites a été réalisée au Service des Basses Température (SBT) de Grenoble, dans l'installation HELIOS.

La maquette #1 a été soumise à différentes charges thermiques continue et transitoire afin d'observer à la fois les valeurs stationnaires de température et de répartition de flux de chaleur mais également pour observer la dynamique du transfert thermique de la partie chauffée (boitier) vers les deux sources de refroidissements (tube et conducteur). Dans ce but, un capteur de débit pour chaque canal ainsi que cinq capteurs de température (deux entrées, deux sorties, une température boitier) ont été installés (voir figure 5).

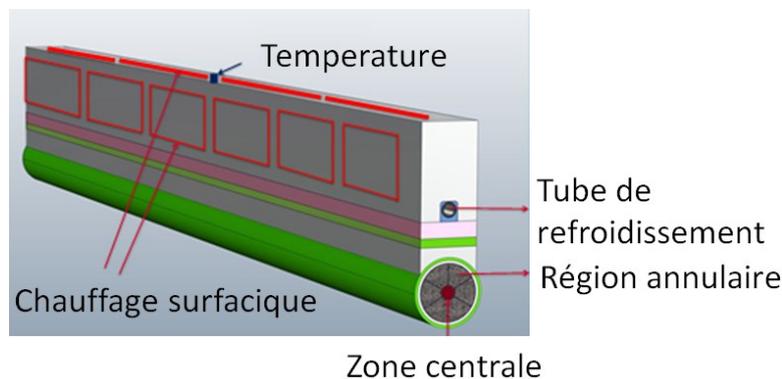


Figure 5 : vue de la maquette #1 : chauffage surfacique et mesure de température sur le boitier

La maquette #2 a été également soumise à des charges thermiques continues ou périodiques. La mesure des températures et des flux stationnaires ainsi que le déphasage et l'atténuation du signal ont été utilisés pour déduire l'échange thermique entre la gaine et l'hélium.

A température cryogénique, l'hypothèse d'une température de paroi identique à la température du fluide est assez juste, ce qui permet de déporter les mesures de température à l'extérieur de la gaine du conducteur, ce qui permet de s'affranchir de mesure interne de température du fluide potentiellement contraignante, notamment vis-à-vis du risque de fuites.

Sur la maquette #1, les mesures de températures du conducteur (entrée/sortie) et du tube de refroidissement (entrée/sortie) ont été réalisées au niveau des collecteurs afin d'obtenir une mesure homogène du fluide. Sur la maquette #2, les mesures fluides ont été effectuées en amont et en aval de chaque manchon. La mesure de température de chaque manchon a été dupliquée (une mesure sur chaque face latérale) pour vérifier l'uniformité.

Résultats

Mesure stationnaire de la maquette #1

Diverses charges thermiques (10 W, 20 W, 30 W et 50 W) ont été appliquées à la maquette #1 afin d'observer les régimes d'équilibres. La figure 6 présente les mesures de températures entrée/sortie du tube de refroidissement et du conducteur ainsi que la mesure de température de la structure dans le cas d'un échelon de chauffage de 30 W.

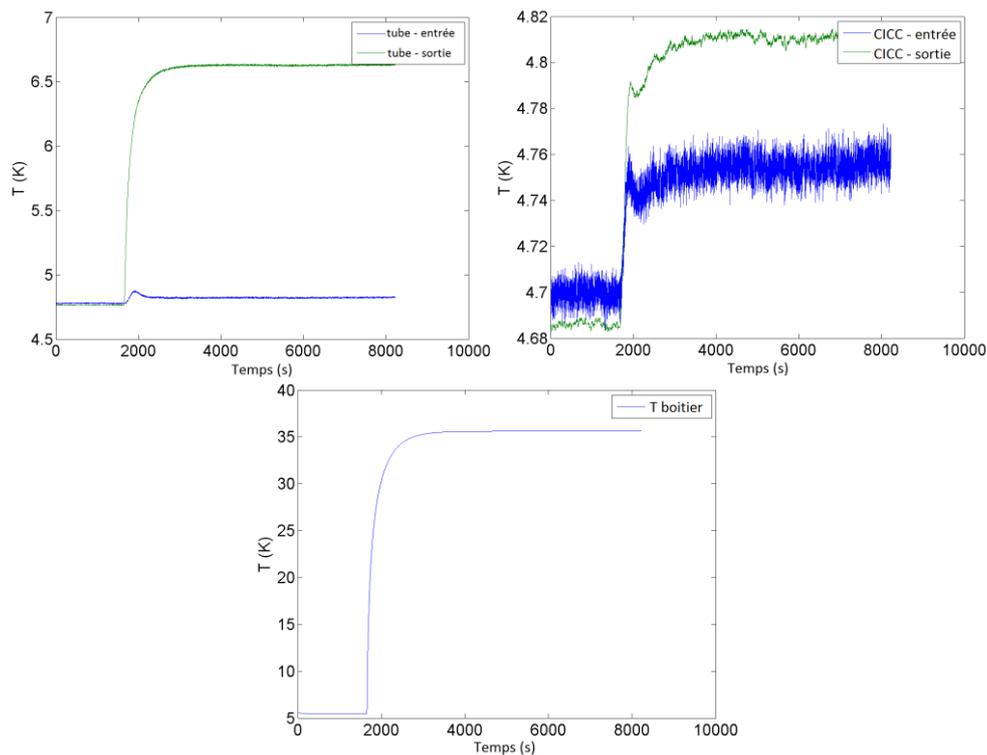


Figure 6 : résultats stationnaires - température fluide et température structure

Ces mesures montrent tout d'abord que le régime stationnaire est atteint au bout d'environ 40 min. L'augmentation de température de l'hélium circulant dans le tube de refroidissement est très importante (~ 2 K) alors que l'augmentation de température de l'hélium circulant dans le CICC se situe dans la barre d'incertitude des capteurs de température (~ 50 mK) pour des débits massiques identiques (2-3 g/s). On peut donc considérer que la répartition des flux sur la maquette #1 est telle que la quasi-totalité du flux est extraite par le tube de refroidissement. A noter que l'augmentation de

la température d'entrée des deux canaux est due à l'augmentation de pression dans la boucle de refroidissement.

Le capteur de température situé sur la face supérieure de la maquette donne également une information importante : en effet, cette mesure ne dépend que de l'empilement des diverses résistances thermiques associées à la conduction thermique : la résistance du boîtier, la résistance de l'interface entre le boîtier et la résine, la résistance de la résine, la résistance de l'interface entre la résine et le tube, la résistance du tube. Enfin la résistance due à la convection avec l'hélium vient s'ajouter aux résistances précédemment listées. Due à un nombre de mesures limitées, l'interprétation des résultats a été réalisée en intégrant artificiellement les résistances d'interface dans la résistance de la résine à l'aide d'une conductivité apparente λ (résine + interfaces). Ainsi, les divers états stationnaires mesurés et la correspondance de la température du boîtier donne la tendance présentée sur la figure 7.

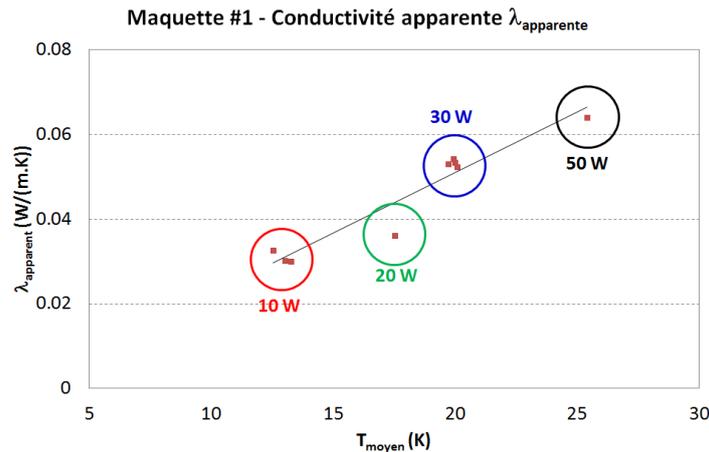


Figure 7 : conductivité thermique apparente (résine+interfaces)

On peut donc noter que, comparés à la conductivité thermique propre de la résine (0.15 W/m/K à 5 K), les mesures donnent par extrapolation une conductivité apparente à 5 K d'environ 0.01 W/m/K, soit une résistance d'interface extraite d'environ 1.4 K.m/W.

Les mesures stationnaires montrent donc que le couplage thermique entre le tube de refroidissement et le boîtier n'est pas aussi performant que ce qui était attendu. En effet, des mesures antérieures avaient montré que les résistances d'interface pouvaient être négligées.

Mesure transitoire de la maquette #1

De nombreux cas de charges ont été testés en dynamique : variation de la puissance (100 W et 150 W) pendant des durées variables (15 s, 30 s, 60 s, 90 s, 120 s et 180 s). Seul le cas 150 W durant 90 s est présenté ici (voir figure 8 et figure 9).

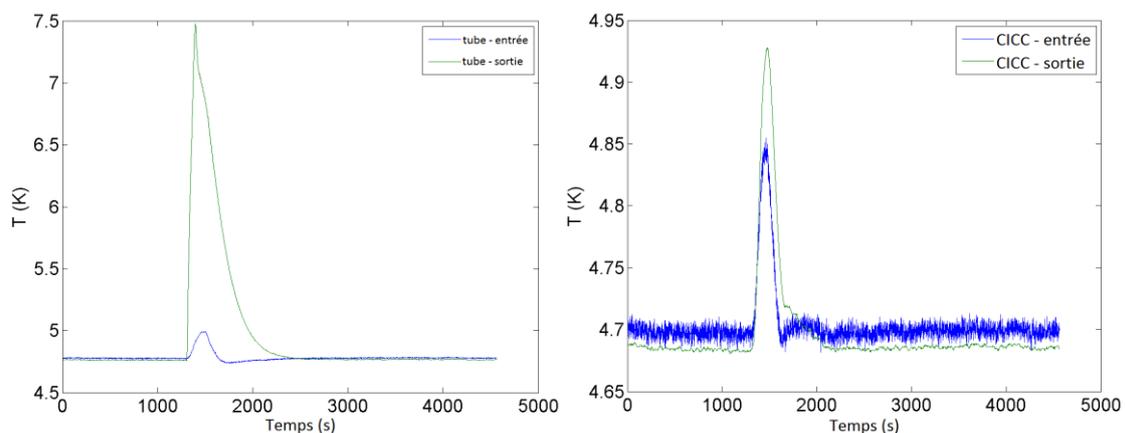


Figure 8 : résultats transitoires - températures fluide

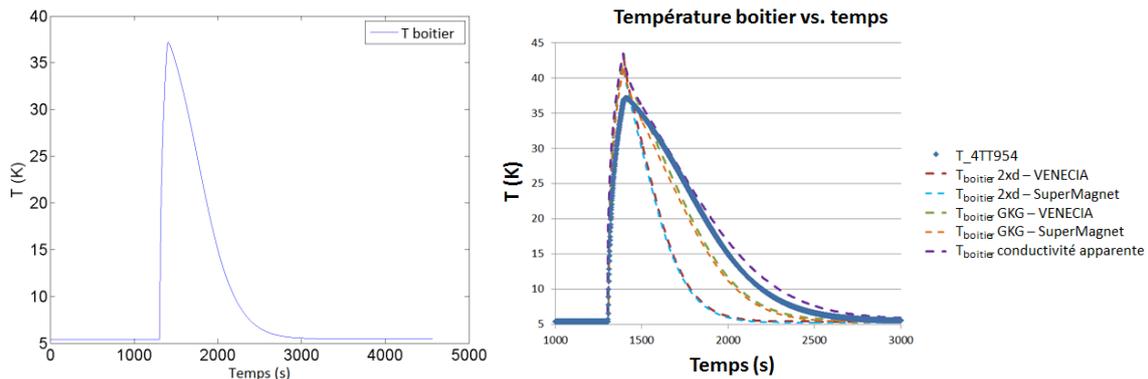


Figure 9 : résultats transitoires - température structure et simulations

La température du boîtier nous renseigne sur le refroidissement une fois le chauffage éteint. En effet, on voit que le refroidissement du boîtier par le tube de refroidissement requiert une trentaine de minutes pour que la structure soit de nouveau à 5 K. Quelques simulations avec deux codes (VENECIA et SuperMagnet) ont permis de simuler le comportement dynamique de la maquette. Une fois encore, en prenant les propriétés de la résine seule (légende « 2xd »), le refroidissement issu des simulations est bien plus rapide que ce qui est observé. En utilisant la loi de conductivité apparente estimée lors des essais stationnaires, les simulations donnent un comportement de la température du boîtier plus proche des résultats expérimentaux.

Par conséquent, les résultats stationnaires et transitoires montrent que le couplage thermique entre le tube et le boîtier est inférieur à celui que l'on peut estimer. Plusieurs explications sont à l'étude :

- Défaut d'homogénéité de la résine ;
- Décollement partiel de la résine lors du refroidissement de la maquette.

Mesure transitoire de la maquette #2

Deux chauffages périodiques sinusoïdaux (période 38 s et 106 s) ont été appliqués sur les manchons en cuivre et associés à deux débits massiques différents (1 g/s et 6 g/s).

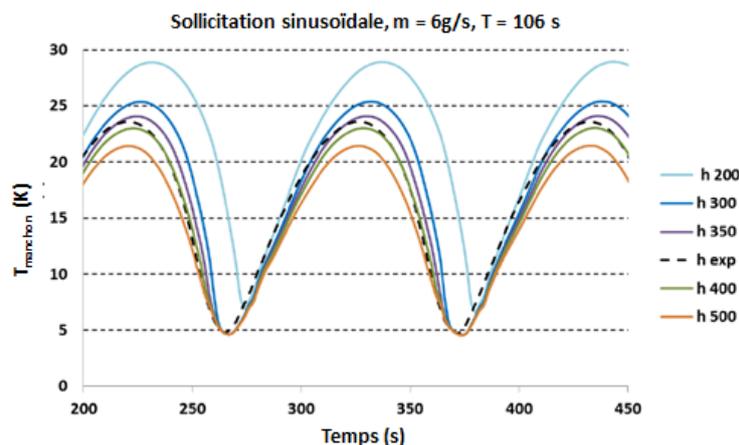


Figure 10 : résultats transitoires

Le coefficient d'échange convectif global entre la gaine et l'hélium de la région annulaire a été ajusté dans les simulations par éléments finis de manière à reproduire au mieux l'évolution de température mesurée sur le manchon. Le couplage thermique gaine / hélium annulaire a ainsi été estimé à environ 350 W/m²/K (figure 10). Cette valeur a été confirmée par les différents essais.

L'aspect non symétrique de la sinusoïde mesurée provient de la forte dépendance de la chaleur spécifique du cuivre en fonction de la température, affectant la constante de temps de diffusion

thermique de la chaleur vers la gaine au fil des variations de température. Notons également que les deux mesures de température de manchon ont donné des valeurs quasi identiques comme attendu.

Conclusion

La campagne de test dans l'installation HELIOS du CEA de Grenoble a permis de faire des mesures inédites sur une maquette intégrée du couplage thermique entre le bobinage d'un électroaimant TF et de la structure mécanique associée.

Les résultats ont montré que le couplage thermique entre le tube de refroidissement et le boîtier en acier n'est pas aussi bon que ce qui était attendu. Plusieurs phénomènes pourraient expliquer la détérioration de l'efficacité de refroidissement : un matériau moins bon conducteur thermique que ce qui était attendu et/ou l'apparition de résistances thermiques de contact. Ces dernières peuvent avoir comme origine le procédé de fabrication, ou encore la mise en froid de la maquette. Il est à noter qu'aucun effort mécanique spécifique n'a été appliqué à la maquette contrairement à ce que la bobine TF subira (forces de Lorentz).

De fortes investigations sur la résine spécifiquement développée pour cette application et sur les éventuelles résistances de contact sont en cours. En effet, des mesures antérieures menées sur des échantillons de faibles dimensions avaient montré que les résistances aux interfaces étaient négligeables [05].

Quant à l'expérience du couplage thermique entre la gaine et l'hélium de la région annulaire, les mesures aboutissent à un ordre de grandeur de $350 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ pour ce coefficient de transfert thermique. Des mesures complémentaires sont toutefois nécessaires pour confirmer les résultats acquis lors de cette campagne et par la suite proposer une corrélation. Ces évaluations complémentaires pourraient être réalisées en utilisant un mode de chauffage différent (chauffage déposé dans les brins par exemple) ou encore en appliquant une méthodologie expérimentale utilisée pour des mesures similaires dans les milieux poreux [06].

Références

[01] ITER – www.iter.org

[02] Hoa, C. et al, HELIOS Helium Loop for High Loads Smoothing: a Cryogenic Scaled down Experiment of the Cooling Circuit of JT-60SA Superconducting Magnets, Proceedings of ICEC-ICMC 23 Wroclaw, 2010.

[03] Y. Wachi, M. Ono, T. Hamajima, Heat transfer characteristics of the supercritical helium in a CICC, IEEE Trans. Appl. Sup., 5(2), 568-571, 1995

[04] B. Renard, J-L. Duchateau, B. Rousset, L. Tadriss, "Evaluation of thermal gradients and thermosiphon in dual channel cable-in-conduit conductors", Cryogenics 46, 2006, 629-642

[05] Hoa C, Rousset B, Lacroix B, Nicollet S, Vallcorba R, Bessette D, Vostner A, Gauthier F. Experimental characterization of the ITER TF structure cooling in HELIOS test facility. Proceedings of CEC-ICMC, Tucson, Arizona, 2015

[06] Serret D, Stamboul T, Topin F. Transfert dans les mousses métalliques : mesure du coefficient de chaleur entre phases. Congrès de la SFT, SFT 07, Ile des Embiez, Mai 2007, pp 190-196.

Remerciements

Les auteurs souhaitent exprimer leurs remerciements aux équipes du SBT CEA Grenoble et du GCRY CEA Cadarache pour leur implication dans la préparation et l'implication dans la campagne de test.