

# **Sujet de thèse : Capteur à fibres optiques intégré pour la mesure des températures dans les machines électriques tournantes**

## **- Sujet de la thèse et son contexte scientifique et économique**

La transition énergétique implique une très forte utilisation de machines électriques : les moteurs électriques représentent à l'heure actuelle entre 43% et 46% de la consommation mondiale d'énergie électrique (source IEA) ; l'utilisation de ces machines ne fera que s'accroître avec l'arrivée de nouveaux systèmes « plus électriques » (mécatroniques : intégration des machines électriques et des systèmes de commande dans les systèmes mécaniques) ainsi que la croissance des énergies renouvelables. L'intégration de machines électriques (motrices et génératrices) dans les systèmes mécaniques implique la prise en compte des environnements contraignants et mécaniquement complexes. Dans ce type d'environnement, le moteur et son système de commande doivent être choisis de façon à obtenir des puissances massiques élevées, tout en limitant la taille du système (compacité). Sous ces conditions, l'analyse thermique, longtemps considérée comme secondaire et abordée de manière indirecte, devient cruciale dans la conception et le diagnostic des machines électriques.

Les contraintes thermiques deviennent un des principaux critères de dimensionnement, elles jouent un facteur de compétitivité dans la construction des machines en termes d'utilisation minimale des matériaux les constituant. D'autre part, une surveillance de la température des machines électriques peut avoir une influence directe sur la durée de vie de ses composants (isolants des conducteurs, aimants, etc) en permettant d'accéder à des informations prédictives. Une cartographie de la température à l'intérieur d'une machine électrique peut aussi donner des informations sur les différentes pertes (au rotor et au stator) et contribuer à améliorer l'efficacité énergétique des moteurs et générateurs électriques en même temps qu'optimiser sa commande (identification de la variation des paramètres en fonction de la température).

La plupart des études sur l'évolution de la température dans les machines électriques essaie de surmonter le problème de la mesure directe en faisant une estimation. La température est obtenue à partir d'un modèle à constantes localisées semi-empirique. Le principal problème de ces modèles réside dans la détermination des coefficients d'échange thermique (conduction et convection principalement) d'où le recours à un recalage du modèle à partir de mesures sur différents points de la machine (en particulier au stator). L'utilisation des cartographies thermiques des machines électriques, obtenues par mesure directe, peut permettre une technique de surveillance et diagnostic rapide. Cette technique reste encore faiblement exploitée par rapport à des méthodes classiquement utilisées en mécanique (signatures vibratoires et émissions acoustiques). En particulier, une cartographie des températures du rotor peut permettre d'avoir un système de surveillance robuste de la température de façon à diagnostiquer et prédire le comportement des différents paramètres. Cette surveillance est néanmoins difficile à mettre en place, à cause de la rotation des parties mécaniques et du positionnement des capteurs à l'intérieur du rotor.

Différentes méthodes de mesure de la température dans le rotor ont été proposées. D'une part, des mesures sans contact par l'intermédiaire des capteurs infrarouges (mesure ponctuelle) ou des caméras infrarouges (champ de températures) ont été développées. D'autre part, des capteurs de température par contact (thermocouples, thermistances...) peuvent être insérés directement dans la structure du rotor. Le principal problème de techniques de mesure sans contact réside dans la détermination de l'émissivité des différentes surfaces composant le rotor. Pour les méthodes de mesure par contact, la mise en place du système de récupération, soit par des bagues collectrices connectées par des balais au système de lecture de la température, soit par l'intermédiaire d'une liaison radio sans fil, peut s'avérer très complexe ou coûteuse.

Les capteurs à fibres optiques (CFOs) sont régulièrement utilisés pour la mesure de température, pression, contraintes ou autres, surtout dans des zones de faible encombrement où la fibre est en proche de la zone de mesure et où sont déportés les systèmes d'émission, de réception et de traitement des données. Ils sont également utilisés pour la surveillance de paramètres internes de systèmes en fonctionnement suite à la position de sondes fibrées dans certaines zones lors de la fabrication ou l'assemblage de ceux-ci. Ces capteurs permettent des mesures locales ou distribuées sur la zone et sont développés en exploitant les différents composants d'un signal passant dans la fibre (intensité, longueur d'onde, fréquence, phase, ...).

Dans cette thèse, nous proposons d'étudier un système de mesure sans contact de la température en plusieurs points à l'intérieur du rotor en utilisant des capteurs à fibres optiques à réseau de Bragg. Nous distinguons quatre enjeux scientifiques auxquels répond cette thèse :

- (1) la détermination des coefficients d'échange thermique (conduction, convection, rayonnement),
- (2) l'identification des pertes séparées (Joules et fer au rotor et au stator),
- (3) l'identification des paramètres pouvant améliorer l'efficacité énergétique globale des machines électriques,
- (4) une méthode intégrée de mesure à fibres de Bragg en environnement dynamique contraint (rotor d'une machine électrique).

#### **- Programme de travail démontrant l'originalité du projet et ses caractères exploratoire & interdisciplinaire**

Dans ce projet, des fibres optiques à réseaux de Bragg seront insérées à l'intérieur du rotor selon son axe de rotation. Un système d'injection et de réception de signaux optiques dans ces fibres sera intégré à proximité du rotor pour permettre la mesure sans contact du composant tournant. Une des originalités du projet repose sur le fait que le système de mesure permettra la visualisation de la variation de la température en plusieurs lieux du rotor pendant son fonctionnement (rotation). Ce système de détection aura une autre originalité, il ne sera pas équipé d'analyseur de spectre permettant de mesurer le décalage de la longueur d'onde filtré en passant par le réseau de Bragg comme classiquement réalisé dans les techniques de capteurs à réseau de Bragg. Nous proposons comme alternative l'utilisation d'un photo-détecteur spécifique permettant la détection séquentielle de la variation de la puissance du signal optique filtré après passage dans un réseau de Bragg placé au cœur du rotor. Cette variation de puissance optique sera reliée à la température au moyen d'un étalonnage. Afin de cartographier la température en plusieurs points au cœur du rotor, plusieurs fibres optiques, intégrant chacune un réseau de Bragg, seront insérées. En outre, ces capteurs à fibres optiques peuvent être utilisés simultanément pour surveiller d'autres paramètres de la machine électrique tels que la vitesse et le sens de la rotation, rendant ainsi l'utilisation de résolveurs inutile. Un point de mesure de la température correspond à la position d'un réseau de Bragg, pour cela, les positions des réseaux de Bragg sur le rotor devront être à priori connues pour permettre d'établir une cartographie de températures du rotor.

Les travaux menés dans cette thèse seront divisés en trois phases :

- L'injection d'une seule longueur d'onde successivement dans plusieurs fibres, chacune équipée d'un seul réseau de Bragg à pas spécifique : dans cette étape, plusieurs fibres optiques seront insérées dans le rotor et les impulsions provenant du laser seront injectées séquentiellement dans les fibres optiques avant qu'elles ne soient successivement détectées par un photo-détecteur. La synchronisation des signaux détectés au moyen d'un résolveur de la machine électrique permettra de connaître les lieux de l'information de la température.
- L'injection de plusieurs longueurs d'ondes dans plusieurs fibres, chacune équipée d'un seul réseau de Bragg : dans ce cas, chaque réseau de Bragg réagit à une longueur d'onde spécifique qui sera détectée par une surface de détection sélective en longueur d'onde. Chaque surface de détection donnera des informations sur la variation de la température dans une zone connue du rotor. Dans ce cas, la synchronisation des signaux détectés est fournie par le détecteur spécifique et en conséquence, la conception de la machine est simplifiée (suppression du résolveur).

- Après validation des deux techniques précédentes, nous comptons continuer à améliorer la méthode de mesure pour pouvoir effectuer de la détection parallèle des variations de la température dans plusieurs positions du rotor en utilisant des fibres équipées de plusieurs réseaux de Bragg.

Une étude sur les signaux qui seront injectés dans les capteurs et reçus à la sortie sera également effectuée. Cela permettra d'optimiser le fonctionnement du capteur. De plus, les signaux reçus seront bruités à cause des vibrations du système et des autres sources parasites (électroniques ou électromagnétiques). Pour cela, des travaux de traitement des signaux seront développés pour permettre l'extraction des bonnes informations de la variation de la température.

#### - État du sujet dans le laboratoire et l'équipe d'accueil

Ce projet, impliquant des membres du Laboratoire Roberval (UMR 7337) et du Laboratoire d'Électromécanique de Compiègne (LEC - EA 1006), permettra un rapprochement méthodologique entre les domaines de la photonique et du capteur (Roberval) et celui du génie électrique (LEC). Cet axe de recherche multidisciplinaire émergent dans le domaine de la surveillance et du diagnostic sans contact de systèmes contribuera à la constitution de l'équipe Mécatronique Energie Electricité Intégration (M2EI) du futur Laboratoire issue de la fusion du Laboratoire Roberval et du LEC (démarrage du nouveau laboratoire au 01/01/18).

L'équipe mécatronique du laboratoire Roberval développe depuis plus d'une dizaine d'années des capteurs essentiellement dédiés aux environnements à fortes contraintes (haute résolution, forte limite d'encombrement, ...), basés sur des technologies photoniques pour rendre insensible leur principe de mesure aux influences magnétiques des systèmes mécatroniques intégrant des micro-actionneurs électromagnétiques. De son côté, le LEC (à compléter)

De son côté, le LEC a des fortes compétences dans le domaine de la conception globale des actionneurs à pilotage électronique. Le LEC a développé des compétences sur les études et la modélisation multi-physiques de ces systèmes et depuis quelques années, a concentré une partie de ces efforts à l'étude du comportement thermique qui est devenue une des contraintes principales. Le LEC a donc entrepris des recherches visant l'intégration des aspects thermiques aussi bien dans le dimensionnement que la surveillance des actionneurs électriques.

#### Programme et échéancier de travail

Les travaux de cette thèse débiteront par une étude bibliographique sur les machines électriques, les capteurs à fibres optiques et les capteurs utilisés actuellement pour mesurer les températures dans les machines électriques tournantes. Dans la suite, l'architecture du capteur sera étudiée ainsi que les types et les modèles des signaux qui peuvent être injectés et le traitement nécessaire de ces signaux pour récupérer les informations en présence des différents bruits affectant la mesure. Après cela, une architecture avec injection et réception statique des signaux optiques sera testée, puis, sur un support tournant avant d'insérer la fibre dans le rotor tournant. Dans la suite, plusieurs fibres seront insérées dans le rotor permettant de multiplier le nombre de points de mesure. Cette architecture sera finalement validée et le capteur sera étalonné. Ces travaux de thèse se dérouleront selon l'ordre chronologique décrit dans le tableau ci-dessous :

	0 mois – 3 mois	3 mois – 6 mois	6 mois – 9 mois	9 mois – 12 mois
Année 1	État de l'art sur les machines électriques tournantes, les capteurs à fibres optiques et les capteurs de températures			
		Etude de l'architecture du capteur Modélisation numérique des signaux		
		Injection et de réception dans un réseau de Bragg Traitement des signaux détectés pour récupérer les informations de la température		
Année 2	Assemblage du capteur sur un élément tournant (incluant le détecteur) Filtrage des signaux détectés en mode de fonctionnement dynamique			
		Conception du capteur à fibres optiques dans un rotor		
			Développement du prototype à plusieurs fibres optiques dans le rotor, calibration de la méthode Détection à basse vitesse de rotation de l'information de la température	
Année 3	Preuve de concept de la méthode de mesure sans contact de la température : Validation à haute vitesse Traitement des signaux pour l'extraction de la température Modélisation thermique multipoints du rotor			
			Rédaction et soutenance	
Tâches communes entre les deux partenaires				
Tâches effectuées par l'UTC				
Tâches effectuées par l'UL				

#### *Echéancier de la thèse*

#### **- Retombés scientifiques et économiques attendus**

Cette thèse visera à développer un capteur à fibres optiques pour la mesure de la température dans différents points d'un rotor d'une machine électrique pendant son fonctionnement. Cela permettra d'avoir une idée précise de la valeur de la température en temps réel en différents endroits du rotor contrairement à ce qui existe actuellement à travers la mesure de la valeur moyenne de la température au moyen d'une caméra thermique ou d'une autre technique similaire. Cette solution permettra de prolonger la durée de vie d'une machine électrique tournante qui peut tomber en panne suite à une pic de chaleur localisée lors de son fonctionnement. Cette solution permettra également d'optimiser la consommation énergétique d'une machine tournante qui peut voir ses performances et son rendement chuter suite à une augmentation de sa température en un ou plusieurs lieux du rotor. La solution étudiée proposera l'utilisation des fibres de Bragg sans les analyseurs de spectres des longueurs d'ondes généralement associés et considérés très coûteux. Une technique de détection originale basée sur l'utilisation des simples photo-détecteurs avec des filtres optiques sélectifs en longueurs d'ondes sera développée. Selon l'originalité de la méthode développée, les partenaires s'orienteront vers un dépôt de brevet pour protéger la propriété intellectuelle liée à ce sujet de recherche.

Ce capteur, développé ici pour les machines électriques tournantes, pourra être adapté pour des autres champs d'applications comme le suivi au cours du temps de chargements mécaniques et/ou thermiques de matériaux composites. Ce champ applicatif pourra faire l'objet d'une activité prospective avec les personnels du laboratoire Roberval (UMR 7337) spécialistes des structures composites à renforts tridimensionnels.

#### - Collaborations prévues

Cette thèse impliquera directement une collaboration interne entre plusieurs équipes de recherche de l'Université de Technologie de Compiègne ainsi qu'une collaboration internationale avec l'Université Libanaise qui participera à l'encadrement de la thèse sur la partie de l'étude de choix des signaux injectés dans le capteur et sur les méthodes de traitement de signaux à la réception pour pouvoir extraire l'information de la température malgré les niveaux de bruit pouvant s'ajouter aux signaux utiles du fait de l'environnement de fonctionnement.

#### - Liste de publications (10 maximum)

- [1] M.A.H. Rasid, A. Ospina, K. El Kadri Benkara, V. Lanfranchi, "A Thermal Study on Small Synchronous Reluctance Machine in Automotive Cycle," 2016 IEEE 16th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2016), Santa Clara, CA, United States, June 08-10, 2016
- [2] Olfa Meksi, Mohd Azri Hizami Rasid, Alejandro Ospina and Vincent Lanfranchi, "Determination of Thermal Contact Resistances for Small TENV Electrical Machine", Sensors & Transducers Journal, vol. 198, no 3, March 2016, pp. 44-54
- [3] Olfa Meksi and Alejandro Ospina Vargas, "Numerical and Experimental Determination of External Heat Transfer Coefficient in small TENV Electric Machines", IEEE Energy Conversion Congress & Exposition (ECCE 2015), Montreal, Canada, September 20-24, 2015
- [4] Khiat A., Lamarque F., Prella C., Pouille Ph., Leester-Schädel M., Büttgenbach S., "Two-dimension fiber optic sensor for high-resolution and long-range measurements", Sensors and Actuators A Physical, Volume 158, Issue 1, Pages 43-50 (March 2010)
- [5] Zaidi S., Lamarque F., Prella C., Carton O., Zeinert A., "Contactless and selective energy transfer to a bistable micro-actuator using laser heated shape memory alloy", Smart Materials and Structures, Vol. 21, 115027 doi:10.1088/0964-1726/21/11/115027 (2012).
- [6] H. Al Hajjar, D. Montero, P. Lallana, C. Vázquez and B. Fracasso, "Spectral and spatial characterization of perfluorinated graded-index polymer optical fibers for the distribution of optical wireless communication cells," J. of Applied Optics, pp. 1138-1145, 2015
- [7] Khiat A., Lamarque F., Prella C., Bencheikh N., Dupont E., "High resolution fibre optic sensor for angular displacement measurements", Measurement Science Technology, 21 025306, doi: [10.1088/0957-0233/21/2/025306](https://doi.org/10.1088/0957-0233/21/2/025306) (2010)