Unité de recherche d'appartenance en 2008-2011 : *(label et n°, intitulé, établissement principal, responsable)* GeM-UMR CNRS 6183, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, Ecole Centrale de Nantes, Arnaud Poitou.	**Unité soumise à une reconnaissance en 2012-2015 :** *(intitulé, établissement support, responsable)*

Nom : Fréour
Prénom : Sylvain
Date de naissance : 14-05-1977
Courriel : sylvain.freour@univ-nantes.fr

Établissement d'affectation ou organisme d'appartenance : GeM – Institut de Recherche en Génie-Civil et Mécanique – UMR CNRS 6183

Enseignant-chercheur ☒ HDR ☐ Corps-grade : maître de conférences seconde classe
Bénéficiaire de la PEDR : ☒
Situation particulière : Néant

Domaine scientifique principal : ☒ 8 Sciences pour l'ingénieur **Rattachement scientifique :** Section du CNU n°28

1) Points forts de vos activités de recherche et résultats marquants :

Mes activités de recherche, exercées au sein de l'équipe Etat Mécanique et Microstructure de l'institut de recherche en Génie-Civil et Mécanique de l'Université de Nantes et de l'Ecole Centrale de Nantes, se situent à la frontière de deux disciplines : la science des matériaux et la mécanique des milieux continus. Mes activités de recherche de ces quatre années s'articulent autour de l'étude du comportement micromécanique de matériaux micro-hétérogènes et macro-homogènes, notamment des métaux, alliages métalliques, composites à matrices métalliques, composites à matrice polymère et couches minces. Les travaux développés durant cette période reposent sur les trois domaines complémentaires que sont : la modélisation, la simulation numérique et les techniques expérimentales. Les thématiques de recherches abordées mettent en jeu des problématiques multi-physiques touchant, entre autres, aux domaines de la mécanique, de la métallurgie, de la thermodynamique, de la chimie. Les travaux réalisés font souvent appel à des approches multi-échelles.
L'effort de recherche a été concentré sur trois principaux axes de recherches :

- Le premier axe de recherche concerne l'exploitation de certains résultats, obtenus durant ma thèse de doctorat, et qui n'avaient pas encore été publiés. Ces travaux concernent l'étude des propriétés et des états mécaniques d'alliages de titane biphasés à applications industrielles, tels que le Ti-17. Dans **ACL02 et ACTI12** sont rapportées des méthodes originales d'identification des coefficients de dilatation thermique de la phase β de cet alliage, ainsi que des constantes d'élasticité du monocristal de cette phase, par un couplage innovant de mesures des déformations des plans diffractant de ce matériau par des techniques de diffraction des rayons X, associées à des modèles de transition d'échelles thermo-élastiques inverses. Les références **ACL05** et **ACTI01** font état de travaux réalisés sur un alliage de Ti-17, au cours desquels on a examiné, lors d'un fraisage, l'influence des paramètres d'usinage (vitesse de coupe, angle de coupe, profondeur de passe, …) sur les états mécaniques résiduels mesurés par la diffraction des rayons X. L'ensemble de ces travaux ont donné lieu à une collaboration avec le professeur **Manuel François** (**Institut Charles Delaunay - LASMIS, UMR CNRS 6279**). L'ouvrage **OS02** s'intègre également à cet axe.
- Le second axe de recherche a été dédié à la mise en place de modèles de transition d'échelles adaptés au traitement rigoureux du cas de **films minces métalliques**. L'équipe Etat Mécanique et Microstructure du GeM a entamé une collaboration internationale avec le **département Mittemeijer du Max Planck Institute de Stuttgart** (Max Planck Institute for Metals Research), afin de mettre en commun les compétences requises pour développer des modèles du comportement des couches minces. La différence essentielle entre le comportement d'un matériau massif et celui d'une couche mince est liée à l'influence des surfaces limites sur les propriétés, cette dernière étant négligeable dans le cas d'un matériau massif, tandis qu'elle devient prépondérante chez les couches minces. Des méthodes originales, numériques et analytiques, ont donc été développées. Celles-ci prennent en compte l'influence de la surface libre ainsi que la morphologie particulière des grains (colonnes ou platelets) souvent observés dans les couches minces. Des analyses de contraintes par diffraction des rayons X, ont permis de tester la robustesse du modèle. Pour finir, ces nouvelles approches ont été comparées avec celles classiquement mises en œuvres pour modéliser le comportement de structures volumiques massives. On a ainsi pu mettre en évidence leur caractère de bornes. Les développements se sont, pour le moment, limités à l'investigation du comportement élastique de films minces. Ces travaux ont donné lieu aux articles référencés **ACL04** et **ACL08** de la liste jointe, en collaboration avec **Udo Welzel**, **Atul Kumar** et **Eric Jan Mittemeijer**, du **Max Planck Institute for Metals Research**.
- Le troisième axe de recherche concerne l'étude du comportement de matériaux composites à matrice polymère. L'utilisation de ces derniers est en plein essor, notamment dans les secteurs à haute technologie

comme l'aéronautique et l'aérospatiale. Dans ce type d'applications, les matériaux composites sont soumis à des sollicitations hygroscopiques, thermiques et mécaniques qui génèrent des contraintes internes. La détermination de ces contraintes est nécessaire à la compréhension et à l'identification des mécanismes de dégradation liés aux conditions environnementales et conditionne les phases de conception et de dimensionnement. Dans le cadre de cette thématique, les actions concernent donc logiquement la mise en place de modèles de transition d'échelles dédiés à la prédiction du comportement de composites soumis à des sollicitations hygro-élastiques. Dans un premier temps, des approches autocohérentes de type Eshelby-Kröner, ainsi que Mori-Tanaka ont été développées en parallèle. Ces travaux préliminaires ont été publiés, notamment dans les références **ACL03**, **ACL06, ACL09**, **ACTI02.** Le principal apport de ces nouveaux modèles est de rendre possible la prédiction de la localisation des états mécaniques macroscopiques à l'échelle des constituants (fibre et matrice), de chacun des plis d'une structure, par l'intermédiaire d'expressions analytiques. Ces données sont essentielles pour une intégration fine de la question de la durabilité et de l'endommagement de ce type de matériaux, qui se produisent en pratique à l'échelle des constituants au sein d'un pli fortement sollicité, plutôt qu'à l'échelle du pli composite. Ce dernier aspect a d'ailleurs été abordé de manière préliminaire dans le cadre du projet **G.A.R.T.EUR.** (Group for Aeronautical Research and Technology in EURope 2006/2009). Les actions de ce groupe de recherche portent sur l'endommagement des composites : Damage Growth in Composites. Les objectifs de ce projet de recherche visent à répondre aux besoins nouveaux découlant de l'emploi des composites dans le cadre d'applications aérospatiales, et notamment, de développer des techniques numériques et expérimentales permettant de prendre en compte la présence d'un endommagement au sein d'une structure composite, ainsi que l'évolution de celui-ci, depuis les premières étapes de la conception, jusqu'à l'analyse détaillée par des Méthodes Eléments Finis. Dans le cadre de ce projet, la contribution de l'équipe Etat Mécanique et Microstructure du GeM a consisté à proposer une méthode multi-échelles inverse permettant d'estimer les enveloppes des seuils d'endommagements de la matrice de plis composites, à partir de résultats expérimentaux obtenus sur des composites uni-directionnels. Ces travaux ont donné lieu à publication dans un ouvrage scientifique : **OS01**.

D'autre part, un certain nombre de travaux, concernant cet axe de recherche, ont été réalisés dans le cadre de collaborations internationales avec **Djelloul Gueribiz**, **Mohamed Rahmani** et **Ahmed Yousfi**, du **Département** de **Génie Mécanique** de **l'Université Amar Telidji Laghouat** (Algérie), ainsi qu'avec les professeurs **K. Loucif** du **Département de mécanique de précision et optique** de **l'Université Ferhat Abbas** de **Sétif** (Algérie) et **Hocine Osmani** du **Laboratoire des Matériaux Non-Métalliques** de **l'Université Ferhat Abbas** de **Sétif** (Algérie). Ces collaborations ont porté, d'une part, sur l'étude du comportement hygro-thermo-mécanique de composites ayant subi un vieillissement thermique (**ACL14**, **ACLN01**, **ACTI04, ACTI10**) et, d'autre part, sur la détermination des propriétés diffusives effectives de plis composites uni-directionnels (**ACL10**, **ACTI03, ACTI09**).

Au cours du quadriennal, mes activités de recherche, se sont fortement recentrées sur cet axe d'investigation. Ce recentrage de mes activités provient directement de ma participation à l'encadrement scientifique de quatre thèses de doctorat :

i) la thèse de **M. Georges YOUSSEF**, soutenue en novembre 2009, intitulée « Couplage diffusion d'humidité/contraintes internes dans les matériaux composites ». Cette thèse s'est inscrite dans le cadre du projet **PRocédés de fabrication Emergents pour les Matériaux de Structure** (**PR.E.M.S.**, 2006-2009). Ce projet s'intéresse aux procédés de fabrication de pièces industrielles dont les brevets ont moins de vingt ans, ainsi qu'aux procédés plus anciens adaptés aujourd'hui à des domaines de production différents de leur destination habituelle.

   Nous avons principalement étudié le comportement diffusif de composites à matrice organique en présence de contraintes internes et externes ainsi que sur les états mécaniques induits. Il s'agit en fait ici de modéliser le comportement hygro-mécanique couplé de structures composites. La présence d'humidité affecte les propriétés mécaniques de la matrice des plis composites, ce qui assouplit la raideur effective de ces derniers. Ceci réduit les états de contraintes internes dans la structure, par comparaison avec la vision découplée traditionnelle. D'autre part, les états mécaniques locaux, notamment le gonflement de la matrice organique induit par la pénétration d'humidité, génèrent un volume libre supplémentaire que de nouvelles molécules d'eau sont susceptibles de venir occuper par la suite (le phénomène est donc partiellement auto-entretenu, tout en étant convergent). La capacité maximale d'absorption d'humidité ainsi que le coefficient de diffusion de la matrice organique ainsi que des plis composites qu'elle constitue évoluent donc au cours du processus de diffusion de l'humidité dans la structure, ce qui génère des profils de propriétés diffusives dans l'épaisseur du matériau, au moins en régime transitoire. L'ensemble de ces phénomènes a été implémenté dans le cadre de nos modèles de transitions d'échelles. Ces travaux ont donné lieu à la publication des articles **ACL11** et **ACL12**, ainsi qu'aux conférences **ACTI06**, **ACTI07** et **ACTI08**. L'ouvrage **OS03** s'intègre également à ce sous-axe de recherche.

ii) la thèse de **M. Emmanuel LACOSTE**, intitulée « Modélisation multi-échelles des contraintes hygro-thermo-mécaniques », ayant débuté en décembre 2007. Cette thèse s'inscrit dans le cadre du projet structurant **LCM-SMART** (2008-2010). Ce projet a pour objectif le développement du système LCM (Liquid Composite Moulding) du futur ; c'est-à-dire permettant d'optimiser l'injection ou l'infusion de la résine liquide à travers des préformes fibreuses pour la production de pièces composites complexes de qualité. Par pièces complexes, on entend des pièces multifonctionnelles dont la géométrie ou la constitution sont défavorables à l'écoulement : pièces localement massives à fort rayon de courbure, présentant des épaisseurs rapidement variables ou encore pièces incorporant des préformes de propriétés physiques différentes. Le partenaire GeM de l'Université de Nantes est principalement impliqué dans la tâche 3 du projet **LCM-SMART** [procédés LCM Liquid Composite Moulding innovants pour pièces complexes en composites], celle-ci étant dédiée à la réalisation de moules composites conçus pour la réalisation de pièces composites épaisses. Sa contribution majeure concerne la simulation numérique des contraintes internes générées par les cycles de service

(température, humidité relative) et des contraintes résiduelles de fabrication. La réalisation de ce travail a donné lieu à la rédaction de l'article **ACL13**, portant sur la modélisation par des approches multi-échelles du Volume Elémentaire Représentatif (V.E.R.) de structures composites présentant une microstructure complexe, notamment un arrangement désordonné des morphologies des inclusions. Cette étude a nécessité la mise en place de solutions multi-échelles, basées sur la solution d'Eshelby au problème de l'inclusion hétérogène unique, compatibles avec la présence, au sein du V.E.R. d'inclusions présentant des morphologies différentes. Les résultats obtenus ont également été présentés dans le cadre des conférences **ACTI05** et **ACTI11**.

iii) la thèse de **M. Hossein RAMEZANI DANA**, intitulée « Durabilité de matériaux composites intelligents », ayant débuté en novembre 2008 et s'inscrivant dans le cadre du projet DECID2 (2008-2011). Le partenaire UMR 6183 GeM est principalement impliqué dans la tâche A4 Durabilité des matériaux intelligents du projet **DEmonstrateur en matériaux Composites Intelligents avec double capacité in-situ du Diagnostic de santé structurale en continu (DECID2)**, dont il assure la responsabilité. Il s'agit d'appréhender le comportement d'une passerelle (ouvrage de Génie-Civil) instrumentée in-situ, notamment par des fibres optiques à réseaux de Bragg, et des capteurs embarqués dans un environnement thermique, hygroscopique et mécanique afin d'estimer la durabilité de cet ensemble. Le GeM intervient également, de par ses compétences expérimentales, dans la mise en place du démonstrateur et au niveau des aspects d'assemblage. La réalisation de ces tâches à donné lieu à une étude préliminaire de l'intrusivité des fibres optiques à réseau de Bragg en termes d'états mécaniques, publiée sous la référence **ACL01**.

iv) la thèse de **M. Bun Eang SAR**, intitulée « Durabilité des matériaux composites sous chargements hygro-mécaniques combinés », ayant débuté en octobre 2009, s'inscrivant au sein du projet **MAREVA** (2010-2013). Dans le cadre du projet structurant **MAquette de REalisation Virtuelle des Aménagements portuaires**, l'équipe État Mécanique et Microstructure (EMM) du GeM, a pour objectif d'étudier l'intégrité d'une structure composite (porte d'un bassin portuaire innovant) soumise à une histoire mécanique (pression différentielle) en interaction avec des conditions hydriques sévères. Les parties expérimentales de ce travail devraient être réalisées en collaboration avec M. **Peter DAVIES** du **Centre IFREMER de Brest**.

2) Production scientifique :

Tableau récapitulatif :

Codification	ACL	ACLN	ASCL	BRE	INV	ACTI	ACTN	COM	AFF	OS	OV	DO	AP
Nombre	14	1	0	0	1	12	4	3	4	3	0	0	0

ACL : Articles dans des revues internationales ou nationales avec comité de lecture répertoriées par l'AERES ou dans les bases de données internationales

ACL01 Jacquemin, F., **Fréour, S.,** Guillén, R. (2006). Analytical Modeling of Transient Hygro-elastic Stress Concentration - Application to embedded optical fiber in a non-uniform transient strain field, Composites Science and Technology, **66**, 397-406.

ACL02 **Fréour, S.,** Gloaguen, D., François, M., Guillén, R. (2006). Application of inverse models and XRD analysis to the determination of Ti-17 β–phase Coefficients of Thermal Expansion, Scripta Materialia, **54**, 1475-1478.

ACL03 **Fréour, S.,** Jacquemin, F., Guillén, R. (2006). Extension of Mori-Tanaka approach to hygroelastic loading of fiber-reinforced composites - Comparison with Eshelby-Kröner self-consistent model, Journal of Reinforced Plastics and Composites, **25**, 1039-1053.

ACL04 Welzel, U., **Fréour, S.,** Kumar, A., Mittemeijer, E.J. (2006). Diffraction stress analysis of grain interaction in polycrystalline materials, Zeitschrift für Kristallographie, **S23**, 43-49.

ACL05 **Fréour, S.,** Girard, E., Guillén, R. (2006). Measurement and interpretation of residual stresses induced in Ti-17 by machining conditions, Materials Science Forum, **524-525**, 563-568.

ACL06 **Fréour, S.,** Jacquemin, F., Guillén, R. (2006). Numerical and analytical scale-transition prediction of hygro-mechanical stresses in multidirectional carbon-epoxy laminates, Materials Science Forum, **524-525**, 439-444.

ACL07 **Fréour, S.,** Jacquemin, F., Guillén, R. (2007). On the use of the geometric mean approximation in estimating the effective hygro-elastic behaviour of fiber-reinforced composites, Journal of Materials Science, **42**, 7537-7543.

ACL08 Welzel, U., **Fréour, S.** (2007) Extension of the Vook-Witt and inverse Vook-Witt elastic grain-interaction models to general loading states, Philosophical Magazine, **87**, 3921-3943.

ACL09 Jacquemin, F., **Fréour, S.,** Guillén, R. (2009). Prediction of local hygroscopic stresses for composite structures – analytical and numerical micromechanical approaches, Composite Science and Technology, **69**, 17-21.

ACL10 Gueribiz, D., Jacquemin, F., Rahmani, M., **Fréour, S.,** Guillén, R., Loucif, K. (2009). Homogenization of moisture diffusing behaviour of composite materials with impermeable or permeable fibres – Application to porous composite materials, Journal of Composite Materials, **43**(12), 1391-1408.

ACL11 Youssef, G., **Fréour, S.,** Jacquemin, F. (2009). Stress-dependent moisture diffusion in composite materials, Journal of Composite Materials, **43**(15), 1621-1637.

ACL12 Youssef, G., **Fréour, S.,** Jacquemin, F. (2009). Effects of moisture dependent constituents properties on the hygroscopic stresses experienced by composite structures, Mechanics of Composite Materials, **45**(4), 369-380.

ACL13 Lacoste, E., **Fréour, S.,** Jacquemin, F. (2010). On the validity of the Kröner-Eshelby scale transition model for inclusion with various morphologies, Mechanics of Materials, **42**(2), 218-226.

ACL14 Yousfi, A., **Fréour, S.,** Jacquemin, F., Rahmani, M., Osmani, H., Guillén, R. (2010). A multi-scale analysis of the mechanical behavior of thermo-oxidized C/epoxy lamina, Mechanics of Composite Materials, **46**(1), 101-112.

ACLN : Articles dans des revues avec comité de lecture non répertoriées dans des bases de données internationales

ACLN01 Yousfi, A., **Fréour, S.,** Jacquemin, F., Rahmani, M., Osmani, H., Guillén, R. (2008). A study of the mechanical behavior of thermo-oxidized composite lamina, Revue des Energies Renouvelables, numéro spécial CISM'08 Oum El Bouaghi, 299 – 310.

INV : Conférences données à l'invitation du Comité d'organisation dans un congrès national ou international

INV01 **Fréour, S.**, Lacoste, E., Jacquemin, F. (2010). Application des approches de transition d'échelles à la modélisation du comportement de nanocomposites, Journées Scientifiques de l'Université de Nantes, 7 Juin 2010, Nantes.

ACTI : Communications avec des actes dans un congrès international

ACTI01 **Fréour, S.,** Girard, E., Guillén, R. (2006). Measurement and interpretation of residual stresses induced in Ti-17 by machining conditions, 7th European Conference on Residual Stresses, 13-15 Septembre 2006, Berlin, Allemagne.

ACTI02 **Fréour, S.,** Jacquemin, F., Guillén, R. (2006). Numerical and analytical scale-transition prediction of hygro-mechanical stresses in multidirectional carbon-epoxy laminates, 7th European Conference on Residual Stresses, 13-15 Septembre 2006, Berlin, Allemagne.

ACTI03 Gueribiz, D., Jacquemin, F., **Fréour, S.,** Rahmani, M., Loucif, K., Guillén, R. (2008). Effective moisture diffusivity of composite materials, XVth international conference on Mechanics of composite materials, 26-30 Mai 2008, Riga, Lettonie.

ACTI04 Yousfi A., **Fréour, S.,** Jacquemin, F., Rahmani, M., Osmani, H., Guillén, R. (2008). A study of the mechanical behavior of thermo-oxidized composite lamina, CISM'08, 2ème Conférence Internationale sur les Sciences de la Mécanique, 16-18 Novembre 2008, Oum El Bouaghi, Algérie.

ACTI05 Lacoste, E., **Fréour, S.,** Jacquemin, F. (2009). On the relevance of the Kröner-Eshelby scale transition model for multi-morphous composite materials, ICSAAM 2009, International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials, 7-11 Septembre 2009, Tarbes, France.

ACTI06 Youssef, G., Jacquemin, F., **Fréour, S.** (2009). Multi-scale coupling between internal stresses and moisture diffusion, ICCM-17, 17th International Conference on Composites Materials, 27-31 Juillet 2009, Edinburgh, Royaume Uni.

ACTI07 Jacquemin, F., **Fréour, S.,** Youssef, G. (2009). On the use of geometric averaging in scale transition models, ICCM-17, 17th International Conference on Composites Materials, 27-31 Juillet 2009, Edinburgh, Royaume Uni.

ACTI08 Youssef, G., Jacquemin, F., **Fréour, S.** (2010). Structure thickness and external load effects on the stress-dependent diffusion of moisture in organic matrix composites, 13th European Conference on Composites Materials, 7 au 10 Juin 2010, Budapest, Hongrie.

ACTI09 Yousfi, A., **Fréour, S.**, Rahmani, M., Osmani, H., Jacquemin, F., Gueribiz, D. (2010). Mechanical effect of oxidation and shrinkage on the C/epoxy lamina, ACMA2010, Marrakech, 12-14 Mai, Maroc.

ACTI10 Gueribiz, D., Jacquemin, F., **Fréour, S.**, Rahmani, M., Loucif, K, Yousfi, A. (2010). Homogenization of moisture diffusivity in composite materials, ACMA2010, Marrakech, 12-14 Mai, Maroc.

ACTI11 Lacoste, E., **Fréour, S.,** Jacquemin, F. (2010) A study of local stresses created during the cure process of a composite tooling material, 8th European Conference on Residual Stresses, 26 au 28 Juin, Riva del Garda, Italie.

ACTI12 **Fréour, S.,** François, M., Guillén, R. (2010) Determining Ti-17 β-phase Single-Crystal Elasticity Constants through X-Ray Diffraction and inverse scale transition model, 8th European Conference on Residual Stresses, 26 au 28 Juin, Riva del Garda, Italie.

OS : Ouvrages scientifiques (ou chapitres de ces ouvrages)

OS01 Jacquemin, F., **Fréour**, **S.** (2008). Multi-scale analysis of fiber-reinforced composite parts submitted to environmental and mechanical loads, publié dans : « Composite Materials Research Progress », Lucas P. Durand (éditeur en chef), Nova Science Publishers Inc., 1er Mars 2008, ISBN: 1600219942 : 9781600219948, 1-50.

OS02 **Fréour, S.** (2010). Modèles de transition d'échelles pour l'étude de matériaux biphasés, Editions Universitaires Européennes, ISBN 978-613-1-50485-3.

OS03 Jacquemin, F., **Fréour, S.** (2010). Mechanical States Induced by Moisture Diffusion in Organic Matrix Composites: Coupled Scale Transition Models, publié dans : « Composite Materials in Engineering Structures », Jennifer M. Davis (éditeur en chef), Nova Science Publishers Inc., ISBN : 978-1-61728-857-9.

3) Points forts de vos activités relevant des missions autres que la recherche :

Participation à des activités d'intérêt général :

- Membre élu du conseil de département de Mesures Physiques de 2004 à 2006.
- Membre élu du conseil de direction de l'IUT de Saint-Nazaire d'octobre 2007 à octobre 2009.
- Organisation des séminaires de l'équipe Etat Mécanique et Microstructure du GeM (depuis fin 2009).
- Rapporteur pour les revues « Journal of Composite Structures » et « Zeitschrift für Kristallographie ».

Participation à des activités pédagogiques :

- J'effectue l'intégralité de mon service statutaire au département Mesures-Physiques de l'I.U.T. de Saint-Nazaire. Au cours du dernier quadriennal, j'ai été amené à effectuer des enseignements au département Techniques de Commercialisation de cet I.U.T., ainsi que dans le cadre de la licence Capteurs, Instrumentation et Métrologie et de la licence Innovation et Développement Industriel. D'autre part, j'ai participé à quatre formations d'ingénieurs : i) la Filière Instrumentation et Métrologie du CNAM, ii) la Filière Génie-Electrique de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, iii) la Formation d'ingénieurs par alternance de l'ITII des Pays de la Loire et iv) la Formation d'ingénieurs du CESI de Saint-Nazaire.

Signature de la personne concernée par cette fiche d'activité

Je certifie n'avoir demandé mon rattachement qu'à une seule unité de recherche en demande de reconnaissance.

Date : Signature :

Signature du responsable de l'unité de recherche d'appartenance en 2008-2011

Date : Signature :