

## Surveillance du procédé d'infusion d'un matériau composite à matrice polymère par implant piézoélectrique.

### *Infusion process monitoring of polymer-matrix composite using an in-situ piezoelectric sensor.*

Corentin Tuloup<sup>1</sup>, Walid Harizi<sup>1</sup>, Zoheir Aboura<sup>1</sup> et Yann Meyer<sup>1,2</sup>

Département Ingénierie Mécanique, Laboratoire Roberval FRE UTC-CNRS 2012  
Sorbonne Universités – Université de Technologie de Compiègne  
Centre de Recherches de Royallieu - CS 60319 – 60203 Compiègne Cedex FRANCE  
e-mail : [corentin.tuloup@utc.fr](mailto:corentin.tuloup@utc.fr)

2 : Univ. Bourgogne Franche-Comté - UTBM  
90010 Belfort Cedex FRANCE

### Résumé

Cet article étudie la surveillance du procédé d'infusion d'une plaque composite fibre de verre/matrice polyester grâce à l'intégration d'un disque piézoélectrique (PZT) fin. La surveillance du procédé (PM) est réalisée par un suivi en temps réel de la variation de capacité électrique du PZT in-situ. Pour avoir une meilleure compréhension de cette variation de capacité, une multi-instrumentation comportant des techniques de Contrôle Non Destructif à la fois internes (thermocouples à cœur) et externes (Thermographie Infrarouge, Emission Acoustique, mesures de pression et de déplacements verticaux) est mise en place autour du système d'infusion ; ceci afin de pouvoir expliciter les variations de capacité en les couplant avec les autres signatures acquises au cours de l'infusion. Afin de pouvoir vérifier la sensibilité du PZT aux diverses étapes de réticulation de la résine, des essais de rhéologie sur la résine seule ont également été réalisés. L'ensemble de ces tests a montré que le PZT est non seulement capable de détecter les moments clés de l'étape d'injection, comme la fin de l'imprégnation de la préforme fibreuse et l'isolation du système de la pompe à vide ; mais aussi ceux de la réticulation, à savoir la gélification et la vitrification.

### Abstract

This article investigates the Liquid Resin Infusion (LRI) technique of glass fiber/polyester composite plates embedding a thin piezoelectric (PZT) disk. The real-time in-situ Process Monitoring (PM) of this technique is conducted using the electrical signature (capacitance) variation of the embedded PZT transducer. To help with the understanding of capacitance variations, an internal/external multi-instrumentation (Infrared Thermography, thermocouples, Acoustic Emission, Z-displacement sensing, pressure sensing) was set on the infusion systems, so that it was possible to make couplings between the various obtained measurements and the PZT capacitance curves. Rheological tests were also performed on pure resin samples to find correlations between the matrix chemo-physical transitions during curing and PZT capacitance inflections during its final decrease. It was shown that the PZT capacitance is sensitive to several key moments of the infusion process, such as the end of preform impregnation, the isolation of the system at the end of resin injection, and the different resin curing stages such as gelation and vitrification. It is therefore a cheap and quite powerful in-situ Non-Destructive Testing device for the PM of the Liquid Resin Infusion (LRI) manufacturing.

**Mots Clés :** Composite à matrice polymère, transducteur piézoélectrique, surveillance de fabrication, infusion, matériaux intelligents.

**Keywords :** Polymer-matrix composite, piezoelectric transducer, process monitoring, infusion, smart materials.

## 1. Introduction

Dans l'industrie des matériaux Composites à Matrice Organique (CMO), les paramètres des procédés de fabrication de type « Liquid Composite Moulding » (LCM) tels que le taux de remplissage du moule, la qualité d'imprégnation des fibres, la cinétique de réticulation de la résine ou encore les gradients internes de température sont relativement difficiles à évaluer, surtout en temps réel. La connaissance de ces paramètres peut être d'une grande aide afin d'optimiser ces

procédés et ainsi obtenir des pièces ayant de meilleures propriétés mécaniques et de bonnes tolérances dimensionnelles. L'étude et le contrôle de ces paramètres, appelé « Process Monitoring » (PM), a déjà été entreprise par diverses équipes de recherche ([1]–[5]). Cependant, on compte encore peu de travaux sur le PM utilisant des techniques de Contrôle Non Destructif (CND), ces dernières étant majoritairement employées pour la surveillance de la vie en service des structures composites déjà fabriquées ([6]–[8]). Les contributions actuelles au PM des CMO par CND utilisent des techniques diverses, à la fois internes et externes. Les techniques externes (ou ex-situ), plus courantes, peuvent impliquer l'utilisation de capteurs de pression [9], de thermocouples [10], de mesures électriques ([11]–[13]) ou encore ultrasonores ([14]–[17]). Les techniques in-situ, quant à elles, permettent une prise de mesure au cœur de la pièce en cours de fabrication grâce à l'insertion du système CND à l'intérieur du composite. On peut ainsi intégrer dans ces derniers des fibres optiques ([18], [19]), des systèmes piézorésistifs ([20], [21]) ou encore des capteurs d'analyses diélectriques (DEA) ([18], [22]).

Dans la continuité des travaux sur le PM in-situ des CMO, le présent article se focalise sur l'insertion d'un disque piézocéramique (PZT) fin à l'intérieur d'une plaque composite fibre de verre/matrice polyester réalisée par infusion, dans l'objectif de réaliser le suivi de fabrication en temps réel de celle-ci grâce à l'information de capacité électrique du PZT. Afin de comprendre l'évolution de cette capacité au cours de la fabrication, une multi-instrumentation comportant des systèmes de CND à la fois internes (2 thermocouples) et externes (1 caméra infrarouge, 4 capteurs d'émission acoustique, 1 capteur de pression et 2 capteurs de déplacement vertical) est mise en place autour du système d'infusion, ceci permettant de mettre en évidence les éventuels couplages multi-physiques existants entre ces données et celles fournies par le PZT. La sensibilité du PZT aux transitions d'états de la résine au cours de sa réticulation a également été investiguée à l'aide de tests de rhéologie oscillatoire réalisés en parallèle sur la résine seule. Les détails relatifs aux expérimentations sont détaillés dans la section suivante.

## 2. Matériels et méthodes

Des disques PZT (Wealthland – China) de diamètre 25mm et d'épaisseur 0.135mm ont été utilisés pour cette étude. Leur capacité statique a été mesurée et comparée aux informations du fabricant avant intégration dans la préforme fibreuse constituée de 6 plis de fibre de verre (armure Sergé 2/2) de dimensions 150\*150mm<sup>2</sup>, tel que présentée dans la (Fig. 1). Le câblage du PZT est réalisé à l'aide de fils de cuivre étamé de diamètre 210μm.

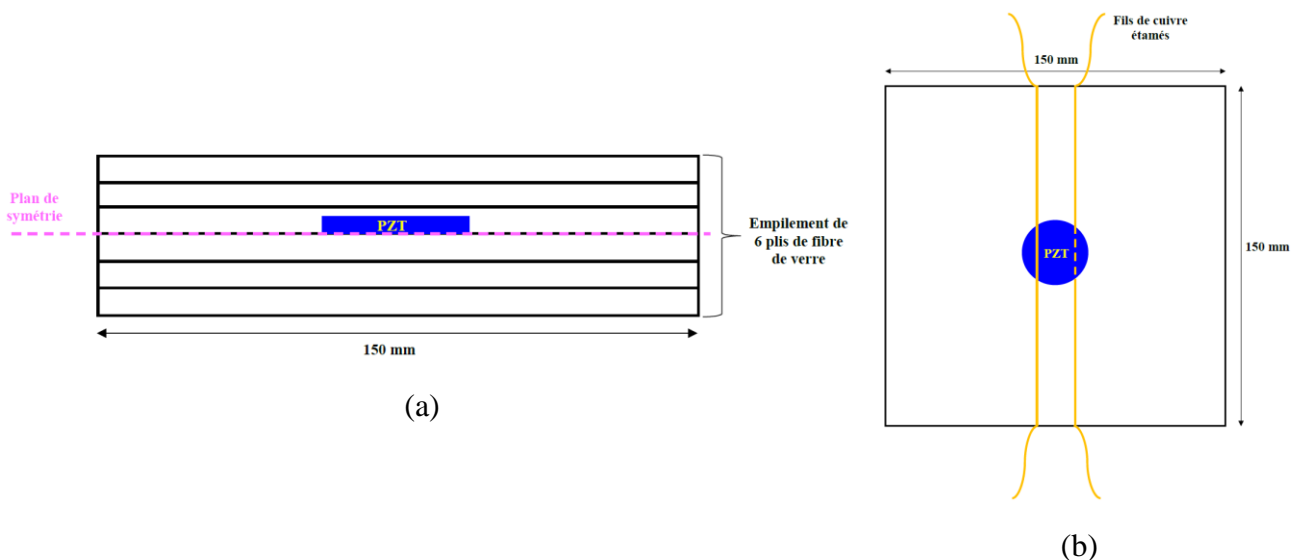


Fig. 1. (a) PZT dans l'empilement fibreux, (b) câblage du PZT

L'infusion est par la suite réalisée à température ambiante en utilisant une résine polyester insaturée mélangée à concentration fixe (1% wt) à un durcisseur de type Peroxyde de Méthyl Éthyle Cétone (PMEC). Durant l'infusion, une multi-instrumentation à la fois interne et externe est utilisée pour récupérer des informations en temps réel sur le procédé de fabrication. Cette multi-instrumentation comprend 1 caméra de thermographie infrarouge (TIR), 4 capteurs d'émission acoustique (EA), 1 capteur de pression, 2 capteurs de déplacement vertical (type LVDT) et 2 thermocouples (1 à cœur de la préforme, 1 en surface). Un multimètre digital est utilisé pour effectuer la mesure de capacité électrique du PZT in-situ. L'injection de la résine conditionne le déclenchement simultané de toutes les instrumentations, afin de pouvoir travailler sur une même base de temps. L'arrêt des acquisitions et le démoulage de la plaque sont réalisés 6 heures après l'injection, pour avoir la certitude de la quasi-complète réticulation de la résine. Le montage complet est présenté en (Fig. 2). Trois plaques ont été fabriquées pour assurer la répétabilité de l'expérimentation.

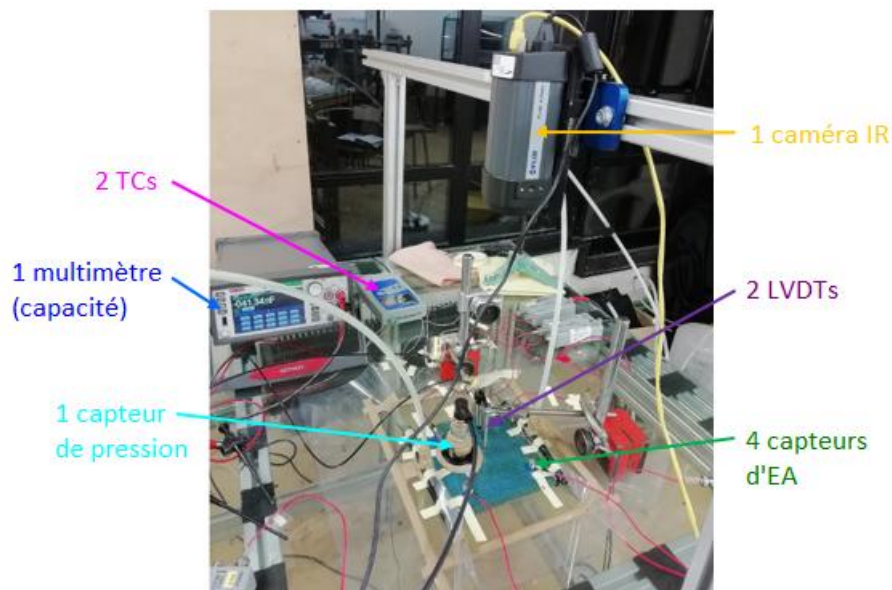


Fig. 2. Montage au complet avant injection

Les tests de rhéologie oscillatoire (3 répétabilités) ont été réalisés à température ambiante sur des échantillons de résine mélangée au même durcisseur PMEC avec une concentration identique à celles des plaques composites infusées. Le test consiste en un cisaillement dynamique du mélange entre deux plateaux plans parallèles maintenus à distance constante l'un de l'autre (1mm), à une déformation constante  $\gamma = 1\%$  et à une fréquence d'oscillation constante  $f = 1\text{Hz}$ . L'essai est conduit jusqu'à la stabilisation du module de la viscosité complexe  $|\eta^*|$ . Afin de pouvoir tracer les courbes de rhéologie et d'infusion ensemble pour détecter les couplages, un  $\Delta t$  constant a été maintenu entre le mélange résine+durcisseur et le début de l'essai pour les 2 types de tests.

### 3. Résultats obtenus et interprétations

#### 3.1 Infusion multi-instrumentée : couplages entre les signatures in et ex-situ

Les résultats typiques obtenus pour l'infusion multi-instrumentée sont présentés en (Fig. 3. a).

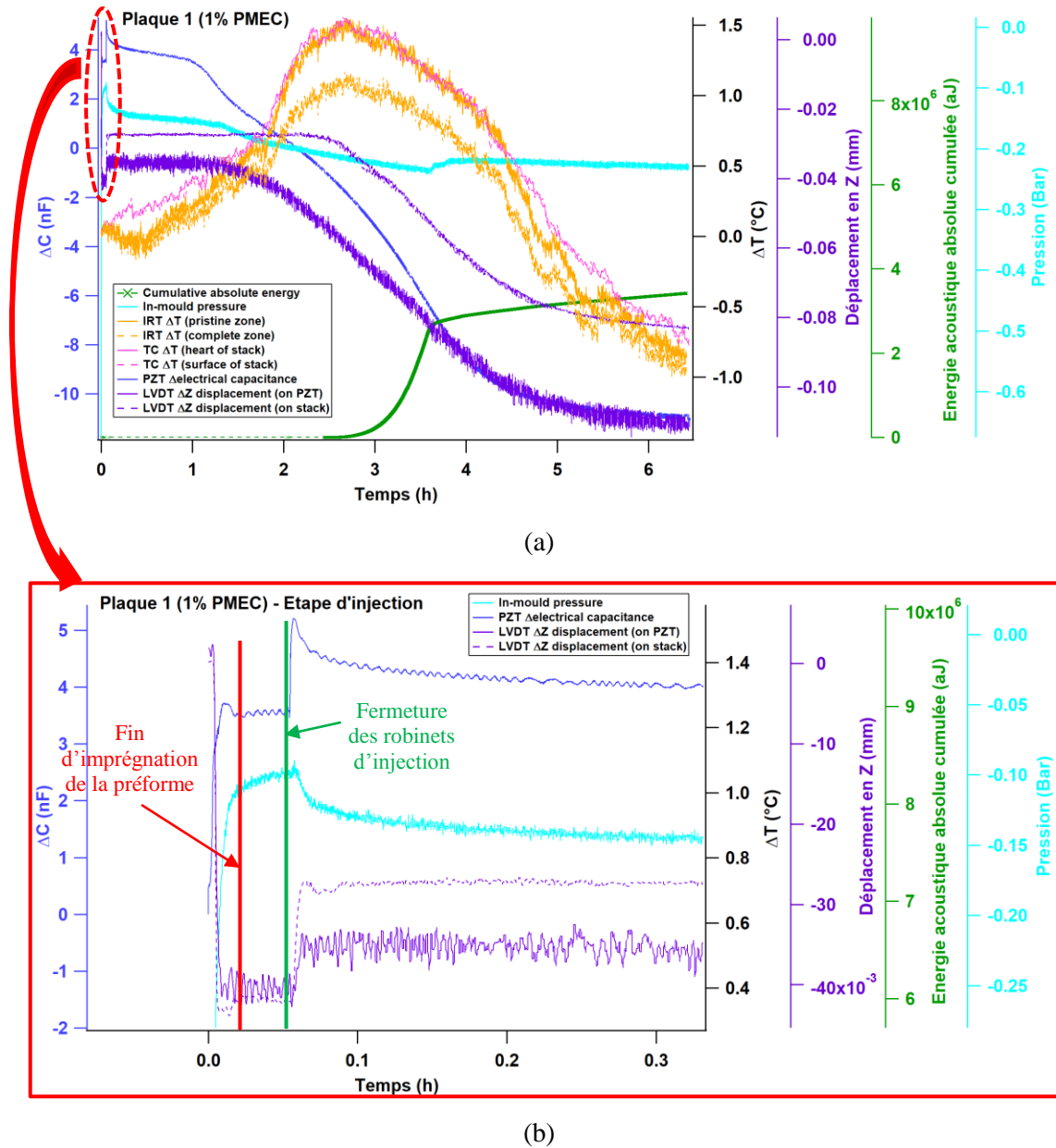


Fig. 3. Résultats de l'infusion multi-instrumentée : (a) expérience entière, (b) étape d'injection de résine (plaque 1)

Il est aisé de constater sur la (Fig. 3. a) que les signatures du TC placé au cœur de la préforme et de la TIR prise dans la zone vierge de la plaque sont similaires. Il est donc justifié de faire confiance à la TIR pour mesurer des phénomènes thermiques à l'intérieur de la plaque, et cela sera de rigueur pour la suite du présent travail. Il est cependant nécessaire de faire la mesure de TIR sur une zone vierge de toute instrumentation, afin de ne pas perturber la caméra avec des réflexions parasites et des différences d'émissivité thermique, ce qui se traduit par une mesure sous-estimée de température lorsque celle-ci est prise sur la plaque complète. Plusieurs couplages sont observables entre les diverses signatures in et ex-situ. Le début de chaque courbe apparaît chaotique, celui-ci correspondant à l'étape d'injection de la résine dans le système d'infusion. La (Fig. 3. b) permet de mettre en évidence les divers phénomènes se produisant au cours de cette étape. L'arrivée de la résine dans la préforme provoque une chute de la dépression créée par la pompe à vide, associée à une augmentation de la capacité électrique ( $\Delta C$ ) du PZT et à une descente des LVDTs. Le comportement de la capacité est expliqué par le relâchement progressif de la pression appliquée sur le PZT par le vide lors de l'imprégnation de la préforme [23], tandis que la chute des LVDT est due

à leur glissement dans une des cavités du tissu drainant positionné sous la bêche à vide. Une stabilisation de l'ensemble des signatures est ensuite observée, correspondant à la fin de l'imprégnation de l'empilement fibreux (démarcation rouge sur la (Fig. 3. b)) : il démarre alors un régime stable durant lequel la résine continue à traverser la préforme afin d'éliminer au mieux les bulles d'air potentielles. La fin de l'injection est associée à la fermeture des 2 robinets d'arrivée et de sortie de résine, ce qui isole la préforme de la pompe à vide (démarcation verte sur la (Fig. 3. b)). Il en résulte une réponse immédiate des 3 signaux, liée à une stabilisation progressive de la pression dans le système isolé : le PZT réagit à la fermeture (pic) puis est de nouveau progressivement comprimé, ce raisonnement allant de pair avec la réaction des LVDTs. Le reste de la fabrication ((Fig. 3. a)) fait apparaître de nouveaux comportements et couplages. La TIR (zone saine) montre une exothermie progressive associée à la réticulation de la résine, qui décroît par la suite une fois la réaction sur sa fin. Après un plateau, la capacité chute de façon continue jusqu'à la fin de l'expérience. Le début de cette chute étant associé à la montée de température, il est clair que le PZT est sensible au démarrage de la réticulation de la matrice polyester. En effet, plus un PZT est contraint dans son environnement (ici la contraction progressive de la résine), plus sa capacité électrique chute [23]. La signature des LVDT renseigne sur le déplacement vertical de la bêche sur lequel ils sont positionnés : il est notable que lorsque la résine se contracte lors de la réticulation, la rétraction associée provoque un déplacement négatif en Z de la plaque, et donc une réaction des LVDTs. Il faut toutefois remarquer que ceux-ci sont moins sensibles que le PZT au démarrage de la réticulation, leur chute se produisant plus tard dans le temps que celle de  $\Delta C$ . Ceci est dû au fait que le PZT est directement entouré par la résine, ce qui rend sa mesure bien plus locale et sensible que celles des LVDTs. Les signatures de capacité et des LVDTs semblent se stabiliser bien après la fin de l'exothermie, ce qui signifie que la réticulation n'est pas encore achevée au pic de température. Les signaux d'EA sont également riches d'information : après quelques signaux captés au départ correspondant au passage du front de résine lors de l'injection, aucun signal n'est relevé jusqu'au pic d'exothermie, à partir duquel l'activité acoustique réapparaît sous la forme de l'augmentation de l'énergie absolue cumulée (EAC) des salves EA détectées. Ce comportement est associé à la variation des propriétés physiques de la résine au cours de la fabrication : avant le pic d'exothermie, la résine atténue trop les signaux acoustiques pour qu'ils soient détectés par les 4 capteurs en surface. Il faut attendre un degré de réticulation suffisant pour que les signaux puissent être transmis, ce qui laisse supposer que le couplage pic exothermique/montée de l'EAC correspond à une transition d'état majeure de la résine. L'activité acoustique liée à la montée de l'EAC est majoritairement due à la vibration du PZT, ceci étant confirmé par la localisation des salves EA correspondantes dans la zone d'intégration du PZT. Deux pentes sont observables dans la courbe d'EAC, le passage de l'une à l'autre se produisant au début de la décroissance de température. Etant donné la quasi-constance du second régime d'EAC, il est clair qu'à ce stade les propriétés de la résine sont stabilisées, renseignant de ce fait sur la fin de la réticulation de la matrice. La variation de pression peut enfin être combinée aux autres mesures : elle suit la tendance du signal de capacité et des LVDTs, reliant ainsi la réticulation de la résine à une dépression progressive dans le système d'infusion. Un point d'intérêt correspond à une ré-augmentation sensible de la pression en fin d'essai, corrélée à la chute de température et au second régime d'EAC préalablement décrits, confirmant donc l'existence à ce stade d'une autre transition dans la réticulation.

La multi-instrumentation ayant permis de montrer la réaction du PZT à la réticulation ainsi que l'existence de transitions d'états au cours de celle-ci, la partie suivante se focalise sur la sensibilité du PZT à détecter ces transitions.

### 3.2 Sensibilité du PZT aux transitions d'états de la résine en réticulation

La décroissance de capacité étant liée à la réticulation de la matrice polyester, l'étude s'est concentrée sur l'analyse de cette décroissance. L'observation de la (Fig. 4) permet d'y déceler trois

régimes, séparés par des inflexions (ou changements de régime). L'existence et l'apparition temporelle de ces régimes et inflexions étant répétables pour chaque plaque fabriquée, l'hypothèse a été émise que les inflexions correspondaient à des transitions d'états de la résine au cours de sa réticulation, et qu'elles encadraient donc différents états physico-chimiques (stables ou instables) de la résine.

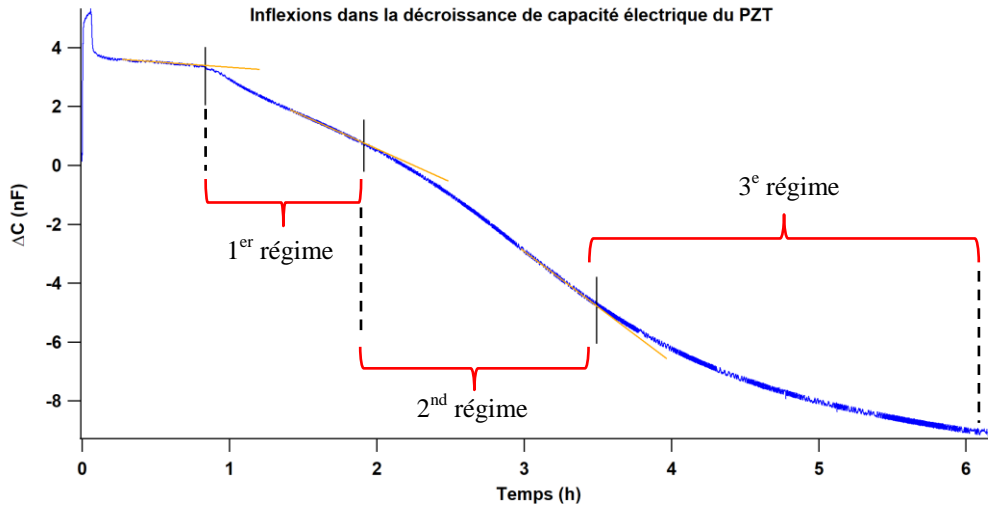


Fig. 4. Méthodologie de mesure des changements de régime de la capacité électrique du PZT

Ces inflexions ont par la suite été corrélées avec les signatures de la multi-instrumentation pour chacune des plaques fabriquées. La première inflexion avait déjà été attribuée au démarrage de la réticulation dans le § 3.1. La seconde inflexion apparaît juste avant le pic exothermique et l'augmentation de l'EAC, ce qui confirme l'hypothèse émise plus haut qu'une transition d'état majeure de la résine se produit à ce moment. La troisième inflexion de capacité se produit après le pic exothermique, à la suite du démarrage du second régime de croissance (quasi-constant) de l'EAC associé à la ré-augmentation finale de pression décrits plus haut : elle correspond donc à une autre transition d'état, celle-ci conduisant à l'état quasi-final de la résine (réaction chimique pratiquement achevée). A cet instant, la résine est presque totalement réticulée, ce qui est également confirmé par la stabilisation progressive de la rétraction de la plaque mesurée par les LVDTs.

Des hypothèses fortes ayant été émises sur la sensibilité du PZT à la réticulation et aux différentes transitions qui la composent, il reste encore à caractériser ces transitions et à confirmer leur lien direct avec les inflexions et régimes détectés sur la décroissance de capacité électrique du PZT. Pour cela, des essais de caractérisation physico-chimique de la résine seule par rhéologie oscillatoire ont été entrepris. Un thermodurcissable tel que la résine polyester passe par différents états au cours de sa réticulation, les deux principaux étant la gélification et la vitrification [24]. La gélification permet à la résine de passer d'un état liquide à un état de gel, puis ce gel se durcit progressivement jusqu'à devenir un verre (étape de vitrification). A la suite de la vitrification, la réaction chimique ralentit (voire s'arrête), même si la température du système est accrue [24]. D'autres événements, tels que la dévitrification ou encore la séparation de phase peuvent survenir au cours de la réticulation, mais ceux-ci n'interviennent pas au cours de la présente étude. L'objectif est donc de caractériser ces deux états principaux, afin de pouvoir les corréler avec les signatures obtenues en infusion. La caractérisation physico-chimique des plaques infusées n'étant pas possible en temps réel, plusieurs échantillons de résine seule (avec P MEC) ont été testés en rhéologie oscillatoire comme détaillé en section 2. Les essais ont été réalisés dans des conditions aussi proches que possible que celles d'infusion, à savoir à température ambiante et à un cisaillement et oscillations les plus faibles possible pour reproduire l'état stable de la résine lorsqu'elle réticule dans la plaque. Ces essais dynamiques, mettant en évidence le comportement viscoélastique de la



résine, permettent de mettre en évidence la gélification par le croisement des courbes de modules de conservation ( $G'$ ) et de perte ( $G''$ ) si l'essai est conduit à une fréquence d'oscillation constante ([25]–[27]); ce croisement allant de pair avec une augmentation du module complexe de viscosité  $|\eta^*|$ . La vitrification est déterminée par le maximum de  $G''$  [28], et chaque résultat est normalisé par rapport à sa masse propre. Les essais sont conduits jusqu'à l'apparition d'un plateau de  $|\eta^*|$ , associé à un ralentissement notable de la réticulation. Ce plateau est considéré comme la fin de la vitrification, sachant qu'il est associé à une chute de  $G''$  signifiant que la résine (réticulée) ne possède plus de propriétés visqueuses (solide élastique avec un  $G'$  maximisé). Les résultats obtenus étant répétables, seuls ceux de l'échantillon 1 sont présentés ci-après. Ces résultats ont ensuite été corrélés avec ceux obtenus en infusion, comme présenté en (Fig. 5). L'analyse de cette dernière figure permet d'associer la première inflexion de capacité électrique au croisement  $G'/G''$ , c'est-à-dire la gélification. Cela confirme que lorsque la résine passe de l'état liquide à l'état de gel, elle commence à comprimer le transducteur PZT, faisant de fait chuter sa capacité. A l'état gel, la résine est un milieu dans lequel les ondes acoustiques sont fortement atténuées (et donc non transmises aux capteurs d'EA externes), ce qui explique pourquoi le signal d'EAC est plat durant cette période. La pression est décroissante à la première inflexion car la résine étant en train de réticuler progressivement (exothermie en augmentation), la dépression du système d'infusion est accrue. Au début de la vitrification (maximum de  $G''$ ), la deuxième inflexion de capacité apparaît. Ce couplage est cohérent car la vitrification fait passer la résine d'un état gélifié à un état de verre beaucoup plus rigide, ce qui augmente la compression vue par le PZT et donc induit un changement dans la décroissance de sa capacité. Cette deuxième inflexion voit également l'exothermie arriver proche de son pic, tandis que l'EAC s'apprête à entrer dans sa première montée. Ces autres couplages sont également en cohérence : étant donné que la réaction chimique de réticulation génère de la chaleur durant toute sa durée, la température associée sera proche de son maximum lors de l'apparition du changement d'état final (vitrification) de la résine. Par ailleurs la résine se transformant progressivement en un état de verre, ses propriétés physiques deviennent de plus en plus proches de celles d'un milieu de propagation suffisamment continu pour transmettre les ondes acoustiques générées par la vibration du PZT, expliquant la montée d'EAC à venir. La résine étant cependant toujours en réticulation à ce stade, la dépression poursuit sa décroissance. La troisième inflexion de capacité se produit plus de trois heures après l'étape d'injection de la résine : à ce stade, le  $G'$  a déjà convergé vers un plateau final, et le  $G''$  est revenu à zéro. Il faut toutefois noter que cette dernière inflexion arrive toujours à un temps jamais atteint en rhéologie, dû au risque de casse du rhéomètre lorsqu'on lui fait tester un échantillon très rigide trop longtemps. Le comportement de  $G'$  et  $G''$  indique que la résine est presque totalement réticulée à ce stade car en tant que solide purement vitreux, elle a seulement un comportement élastique et plus aucunes propriétés visqueuses. Cette troisième inflexion de capacité électrique est associée avec le changement de pente de l'EAC (dit précédemment) vers un comportement quasi-linéaire jusqu'à la fin de la fabrication, ce qui confirme l'hypothèse qu'à ce stade la résine possède ses propriétés finales et transmet donc toujours les ondes acoustiques de la même manière. Une corrélation avec la chute de température suivant le pic exothermique ainsi qu'avec la remontée finale de pression est également observable. Cela signifie que la résine étant presque entièrement réticulée, la réaction chimique presque achevée ne dégage pratiquement plus de chaleur (d'où la décroissance progressive de température), et que l'ouverture pratiquée dans la bêche à vide pour effectuer la mesure de pression a été partiellement rebouchée par la résine vitrifiée. Un point important est la continuité de la décroissance (certes beaucoup plus lente qu'auparavant) de la capacité électrique après cette dernière inflexion, signe que la réticulation bien que pratiquement achevée, est encore active. Il reste toujours en effet quelques pourcentages résiduels de résine à réticuler.

Il est donc désormais possible d'associer chacune des trois inflexions de capacité électrique du PZT in-situ avec le démarrage d'une transformation physico-chimique de la résine polyester en

réticulation : la gélification, la vitrification et enfin la lente transformation d'une faible quantité de résine résiduelle encore non réticulée après la fin de la vitrification.

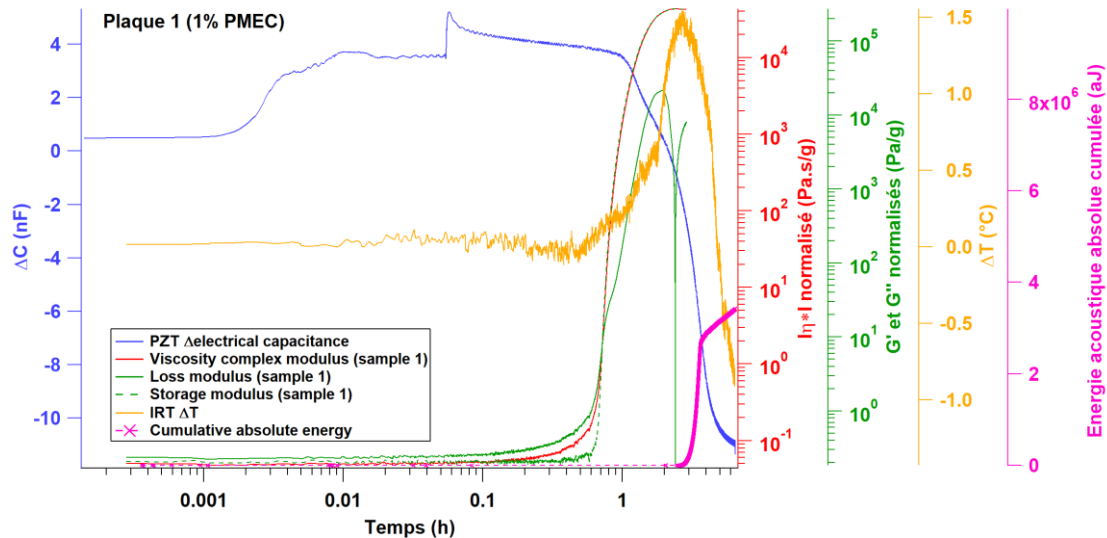


Fig. 5. Comparaison des mesures prises en infusion et en rhéologie

#### 4. Conclusion et ouverture

Cet article étudie l'intérêt de l'insertion d'un disque fin en céramique piézoélectrique (PZT) à l'intérieur d'une préforme composite CMO afin de réaliser une surveillance in-situ et en temps réel de sa fabrication par infusion. Plusieurs instrumentations in et ex-situ de CND sont employées en complément du PZT dans l'objectif d'obtenir des corrélations entre les différentes signatures. De multiples couplages sont observés, fournissant des informations à la fois sur l'imprégnation de la préforme lors de l'injection et sur la réticulation de la résine. Le signal de capacité électrique du PZT présente trois différentes inflexions durant sa phase finale de décroissance, et ces dernières ont été étudiées grâce aux données de multi-instrumentation associées à des mesures de rhéologie réalisées sur des échantillons de résine seule. Ces derniers tests ont permis d'associer la première inflexion de capacité au début de gélification de la résine, la seconde à son début de vitrification et la dernière à la réticulation des derniers pourcentages de résine encore non transformés en fin de vitrification. Le PZT in-situ donnant des informations répétables et relativement précises à propos des diverses transitions majeures (physico-chimiques ou non) se produisant au cours du procédé d'infusion, son potentiel est évident. La fin de la vitrification (troisième inflexion) est particulièrement intéressante, car elle peut être utilisée dans l'industrie pour déterminer à partir de quel moment démouler des pièces composites sans risquer de les endommager, et ainsi accroître les taux de production. Ces informations sur les transitions peuvent également se révéler très utiles dans le cas de procédés utilisant des moules fermés, comme le RTM, où il est impossible de visualiser la progression de la fabrication. Ce travail a également démontré l'intérêt d'utiliser une multi-instrumentation pour monitorer ce procédé en temps réel, et en particulier l'emploi du couple PZT (transducteur)-EA (capteurs) pour détecter la présence de la phase de vitrification par acousto-ultrasons. L'intérêt final de cette étude réside dans le fait d'obtenir un matériau composite « intelligent » possédant un transducteur PZT connecté à cœur à la suite de la fabrication. Le PZT peut alors être employé pour des applications de surveillance de santé des structures composites en service, lorsque ces dernières sont soumises à divers chargements physiques. Trouver des seuils permettant de savoir quand arrêter la structure pour la contrôler plus en détails ou la remplacer



complètement, le tout sans avoir à utiliser les techniques externes et encombrantes de CND du marché serait une avancée majeure dans l'industrie des matériaux composites.

## Références

- [1] A. Hautefeuille, S. Comas-Cardona, and C. Binetruy, "Mechanical signature and full-field measurement of flow-induced large in-plane deformation of fibrous reinforcements in composite processing," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 118, no. December 2018, pp. 213–222, 2019.
- [2] B. Gourichon, C. Binetruy, and P. Krawczak, "Experimental investigation of high fiber tow count fabric unsaturation during RTM," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 66, no. 7–8, pp. 976–982, 2006.
- [3] D. May *et al.*, "In-Plane Permeability Characterization of Engineering Textiles Based On Radial Flow Experiments: A Benchmark Exercise," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 121, no. March, pp. 100–114, 2019.
- [4] V. H. Nguyen, M. Deléglise-Lagardère, and C. H. Park, "Modeling of resin flow in natural fiber reinforcement for liquid composite molding processes," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 113, pp. 38–45, 2015.
- [5] S. P. Bancora, C. Binetruy, S. G. Advani, E. Syerko, and S. Comas-Cardona, "Effective permeability averaging scheme to address in-plane anisotropy effects in multi-layered preforms," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 113, no. July, pp. 359–369, 2018.
- [6] W. Harizi, S. Chaki, G. Bourse, and M. Ourak, "Mechanical damage characterization of glass fiber-reinforced polymer laminates by ultrasonic maps," *Compos. Part B Eng.*, vol. 70, pp. 131–137, 2015.
- [7] A. T. Martins, Z. Aboura, W. Harizi, A. Laksimi, and K. Khellil, "Structural health monitoring for GFRP composite by the piezoresistive response in the tufted reinforcements," *Compos. Struct.*, 2018.
- [8] K. Hamdi, Z. Aboura, W. Harizi, and K. Khellil, "Improvement of the electrical conductivity of carbon fiber reinforced polymer by incorporation of nanofillers and the resulting thermal and mechanical behavior," *J. Compos. Mater.*, p. 002199831772658, 2017.
- [9] S. Leonard-Williams, "The crossover from RTM to resin infusion," *Reinf. Plast.*, vol. 52, no. 10, pp. 28–29, Nov. 2008.
- [10] M. Deléglise, C. Binetruy, P. Castaing, and P. Krawczak, "Use of non local equilibrium theory to predict transient temperature during non-isothermal resin flow in a fibrous medium," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 50, no. 11–12, pp. 2317–2324, 2007.
- [11] K. Hoes *et al.*, "New set-up for measurement of permeability properties of fibrous reinforcements for RTM," *Compos. - Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 33, no. 7, pp. 959–969, 2002.
- [12] R. Matsuzaki, S. Kobayashi, A. Todoroki, and Y. Mizutani, "Cross-sectional monitoring of resin impregnation using an area-sensor array in an RTM process," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 43, no. 4, pp. 695–702, 2012.
- [13] S. Kobayashi, R. Matsuzaki, and A. Todoroki, "Multipoint cure monitoring of CFRP laminates using a flexible matrix sensor," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 69, no. 3–4, pp. 378–384, 2009.
- [14] N. Ghodhbani, P. Marechal, and H. Duflo, "Ultrasonic broadband characterization of a viscous liquid: Methods and perturbation factors," *Ultrasonics*, vol. 56, pp. 308–317, 2015.
- [15] R. Kline, N. Parasnis, and R. Konanur, "Ultrasonic monitoring of the dynamic properties of composites during manufacture," *Ultrason. Symp.*, vol. 9, no. 6, pp. 0–87, 1992.
- [16] N. Samet, P. Maréchal, and H. Duflo, "Ultrasound monitoring of bubble size and velocity in a fluid model using phased array transducer," *NDT E Int.*, vol. 44, no. 7, pp. 621–627, 2011.
- [17] N. Samet, P. Marechal, and H. Duflo, "Monitoring of an ascending air bubble in a viscous fluid/fiber matrix medium using a phased array transducer," *Eur. J. Mech. B/Fluids*, vol. 54, pp. 45–52, 2015.
- [18] E. Marin, L. Robert, S. Triollet, and Y. Ouerdane, "Liquid Resin Infusion process monitoring with superimposed Fibre Bragg Grating sensor," *Polym. Test.*, vol. 31, no. 8, pp. 1045–1052, 2012.
- [19] L. P. Canal, M. Benavente, M. Hausmann, and V. Michaud, "Process-induced strains in RTM processing of polyurethane/carbon composites," *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 78, pp. 264–273, 2015.
- [20] M. A. Ali, R. Umer, K. A. Khan, Y. A. Samad, K. Liao, and W. Cantwell, "Graphene coated piezo-resistive fabrics for liquid composite molding process monitoring," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 148, pp. 106–114, 2017.
- [21] J. M. Park, S. Il Lee, and J. H. Choi, "Cure monitoring and residual stress sensing of single-carbon fiber reinforced epoxy composites using electrical resistivity measurement," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 65, no. 3–4, pp. 571–580, 2005.
- [22] U. Müller, C. Pretschuh, R. Mitter, and S. Knappe, "Dielectric analysis as a cure monitoring system for UF particle boards," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 73, pp. 45–50, 2017.
- [23] N. Elvin, A. Elvin, and B. Z. Senderos, "Capacitance changes in thin piezoelectric transducers embedded in isotropic host materials," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 29, no. 5, pp. 816–829, Mar. 2018.
- [24] M. C. Kazilas, *Acquisition and Interpretation of Dielectric Data For Thermoset Cure Monitoring*. 2003.
- [25] H. H. Winter and F. Chambon, "Analysis of Linear Viscoelasticity of a Crosslinking Polymer at the Gel Point,"

- J. Rheol. (N. Y. N. Y.)*, vol. 30, no. 2, pp. 367–382, Apr. 1986.
- [26] M. Haider, P. Hubert, and L. Lessard, “Cure shrinkage characterization and modeling of a polyester resin containing low profile additives,” vol. 38, pp. 994–1009, 2007.
- [27] S. Dev, P. N. Shah, Y. Zhang, D. Ryan, C. J. Hansen, and Y. Lee, “Synthesis and mechanical properties of flame retardant vinyl ester resin for structural composites,” *Polymer (Guildf.)*, vol. 133, pp. 20–29, 2017.
- [28] B. Van Mele, H. Rahier, G. Van Assche, and S. Swier, “The Application of Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry for the Characterisation of Curing Systems,” pp. 83–160, 2006.