

Modélisation statistique des amplitudes des émissions acoustiques induite par l'endommagement dans des stratifiés thermoplastiques.

M. Chehazi^{1,2}, D. Vasiukov², S. Chaki², P. Kerfriden¹

¹ MINES Paris PSL, Centre des Matériaux, 21, allée des Marronniers,
78000 Versailles, France

² Center for Materials and Processes, IMT Nord Europe, Institut Mines-Télécom,
Université de Lille, F-59000 Lille, France

Résumé — Ce travail propose un cadre de modélisation reliant l'émission acoustique (EA) à l'endommagement dans des stratifiés CFRP thermoplastiques. Un modèle d'endommagement continu à l'échelle méso est implémenté en éléments finis afin de décrire l'évolution des variables d'endommagement au niveau du pli. L'activité d'EA est modélisée par un processus ponctuel de Poisson non homogène, dont l'intensité est proportionnelle à la vitesse d'endommagement, tandis que la distribution d'amplitude dépend du niveau d'endommagement. Les paramètres statistiques de ce modèle sont à identifier par maximum de vraisemblance à partir d'essais de traction instrumentés en EA sur un Composites carbone thermoplastiques unidirectionnels. Cette approche ouvre la voie à un jumeau numérique capable de prédire simultanément la réponse mécanique et l'activité d'EA.

Mots clés — émission acoustique, endommagement, processus ponctuel de Poisson, jumeau numérique.

1 Introduction

Les composites polymères renforcés de fibres de carbone sont largement utilisés dans les structures à haute performance, mais présentent des mécanismes d'endommagement internes complexes (fissuration de matrice, décohésion fibre-matrice, rupture de fibres, délaminage) généralement invisibles en surface [1]. Le contrôle non destructif classique est bien adapté aux inspections périodiques, mais moins à une surveillance continue en service.

L'émission acoustique (EA) offre une approche prometteuse de SHM : les capteurs enregistrent des ondes élastiques transitoires générées par des événements d'endommagement localisés. De nombreuses approches *data-driven* (clustering, analyse multivariée, réseaux de neurones) ont été développées pour classifier les signaux et les relier à des mécanismes de dommage [7, 8]. Parallèlement, des travaux ont cherché à coupler plus directement EA et modèles mécaniques [4, 5, 6, 9].

La plupart de ces approches restent cependant centrées sur le traitement du signal, avec un couplage limité au modèle mécanique. L'objectif ici est de proposer un cadre basé sur un modèle qui relie explicitement un modèle d'endommagement mésoéchelle à un processus ponctuel de Poisson non homogène décrivant les événements d'EA. Le cas étudié est un stratifié et l'objectif est de construire un jumeau numérique : un modèle calculatoire capable de prédire de manière cohérente la réponse mécanique et l'activité d'EA associée, à partir d'un même ensemble de paramètres physiques et statistiques.

2 Modèle mécanique mésoéchelle et mise en œuvre EF

2.1 Modèle d'endommagement au niveau du pli

On considère un modèle d'endommagement continu méso échelle [11, 12, 10]. Le modèle prend en compte les principaux variables d'endommagement : la perte de rigidité transverse d_2 et la perte de rigidité dans la direction des fibres d_1 . Le délaminage n'est pas pris en considération. La dégradation de rigidité est incorporée via une matrice de rigidité endommagée dans le repère local du pli :

$$\tilde{\mathbf{C}}(\underline{d}, \theta = 0) = \tilde{\mathbf{C}}_0 - \sum_{i=1}^2 d_i \mathbf{A}_i \tilde{\mathbf{C}}_0 \quad (1)$$

où \tilde{C}_0 est la rigidité initiale et A_i des matrices de dégradation associées à deux variables d'endommagement d_1 et d_2 . Pour les plis hors axe,

$$C(\underline{d}, \theta) = R(\theta)^T \tilde{C}(\underline{d}, 0) R(\theta) \quad \underline{d} = \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \end{pmatrix} \quad (2)$$

avec $R(\theta)$ la matrice de rotation, la loi de comportement s'écrit

$$\underline{\sigma} = \mathbf{C}(\underline{d}, \theta) \underline{\varepsilon} \quad \underline{\varepsilon} = \frac{1}{2} (\nabla \underline{u} + \nabla \underline{u}^T) \quad (3)$$

d'où l'on déduit les forces thermodynamiques associées Y_i . L'évolution des d_i est décrite par une loi exponentielle classiquement utilisée pour la fissuration transverse :

$$d_i(Y_i) = d_{ci} \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{\sqrt{Y_i} - \sqrt{Y_i^0}}{\sqrt{Y_{ci}}} \right)^c \right) \right], \quad Y_i \geq Y_i^0, \quad (4)$$

et $d_i = 0$ sinon. Les paramètres $Y_i^0 = 0$, Y_{ci} , $d_{ci} = 0.99$ et c sont identifiés à partir d'essais et la littérature. Le module longitudinal E_L a été mesuré, tandis que E_T , G_{LT} , G_{23} ainsi que les paramètres d'endommagement ont été estimés à partir de la littérature [12, 11, 13].

2.2 Implémentation EF et matériau étudié

Le modèle est implémenté dans l'environnement éléments finis Fenicsx [14]. La structure étudiée est une éprouvette Composites carbone thermoplastiques unidirectionnels. Le maillage est généré avec Gmsh, chaque élément fini correspondant à un volume Ω^e sur lequel les variables internes sont mises à jour. Des conditions de déplacement imposent un chargement monotone en traction.

Les propriétés mécaniques macroscopiques mesurées sont résumées dans le Tableau 1. L'éprouvette et un champ d'endommagement simulé sont illustrés sur les Figures 1 et 2.

Propriété	Valeur
Module d'Young E	134,22 GPa
Coefficient de Poisson ν	0,329
Contrainte ultime σ_{ult}	2458,91 MPa
Déformation ultime $\varepsilon_{xx,ult}$	1,74 %

TABLE 1 – Propriétés mécaniques mesurées du Composites carbone thermoplastiques unidirectionnels de l'essai.

2.3 Processus de Poisson ponctuel(PPP) non homogène

Le signal d'émission acoustique est caractérisé par plusieurs paramètres, tels que l'amplitude, l'énergie et la fréquence. Dans ce travail, seule l'amplitude est considérée comme variable descriptive de chaque événement. L'activité des émissions acoustiques est modélisée par un processus ponctuel de Poisson (PPP) non homogène sur l'espace (x, t, A) , où x désigne la position, t le temps et A l'amplitude. Les processus ponctuels de Poisson sont des ensembles aléatoires de points distribués selon une loi de probabilité donnée ; ils constituent un modèle fondamental pour la description de phénomènes aléatoires et servent souvent de base à des modèles plus complexes[15, 16].

Pour tout ensemble mesurable B , le nombre d'événements $N(B)$ suit une loi de Poisson de moyenne, où $\lambda(x, t, A)$ désigne l'intensité du processus :

$$\mathbb{E}[N(B)] = \int_B \lambda(x, t, A) dx dt dA, \quad B \subset \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}_+ \quad (5)$$

Dans notre cas, nous considérons un domaine élémentaire $B = \Theta \times [A^-, A^+] \times [t^-, t^+]$, où $\Theta \subset \Omega$ est une région spatiale, $[t^-, t^+]$ un intervalle de temps, et $[A^-, A^+]$ un intervalle d'amplitudes.

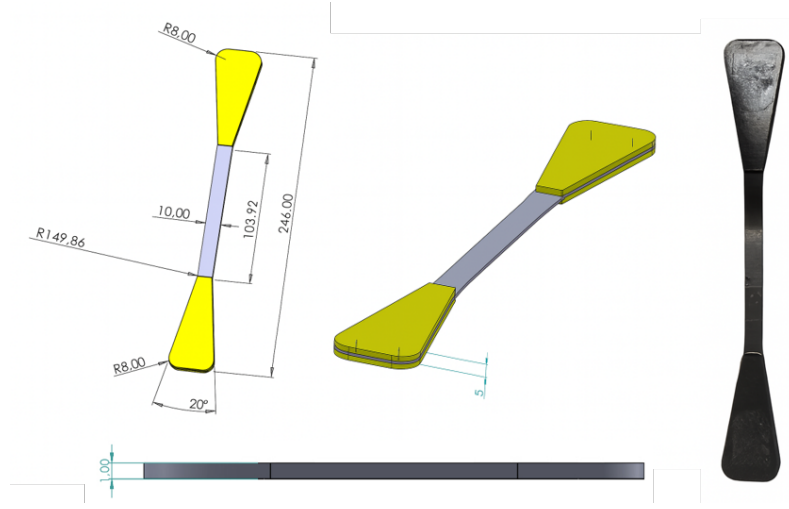


FIGURE 1 – Éprouvette unidirectionnelle 3 plis avec talons, préparée pour un essai de traction.

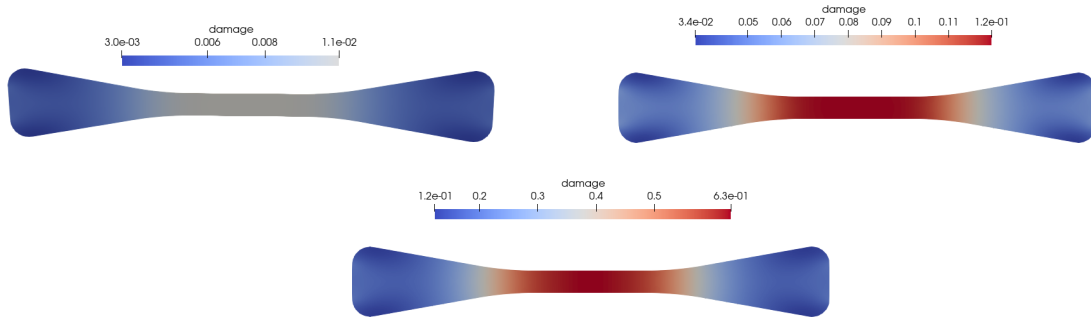


FIGURE 2 – Exemple de champ d'endommagement simulé d_2 (vue dans le plan XY).

Afin de coupler l'EA à l'endommagement, nous postulons que l'intensité dépend de la variable d'endommagement locale $d(x,t)$ et de sa dérivée temporelle $\dot{d}(x,t)$:

$$\lambda(A, x, t) = \lambda(A, \dot{d}(x, t), d(x, t)). \quad (6)$$

Nous introduisons ensuite l'hypothèse :

$$\lambda(A, x, t) = \dot{d}(x, t) \tilde{\lambda}(A, d(x, t)), \quad (7)$$

c'est-à-dire que le taux d'événements est proportionnel à la vitesse d'endommagement, tandis que la distribution d'amplitude dépend du niveau d'endommagement. En particulier, si $\dot{d}(x, t) = 0$, alors $\lambda(A, x, t) = 0$ et aucune nouvelle émission acoustique n'est générée.

2.4 Discrétisation sur éléments finis et pas de temps

Pour l'implémentation numérique, le domaine est discrétisé en éléments finis Ω^e et l'historique de chargement en pas de temps $\Delta T^i = [t^i, t^{i+1}]$. Sur chaque cellule, espace temps

$$\Gamma^{ei} = \Omega^e \times \Delta T^i,$$

nous supposons que l'endommagement d et sa vitesse \dot{d} sont constants : $d(x, t) \approx d^{ei}$, $\dot{d}(x, t) \approx \dot{d}^{ei}$ pour $(x, t) \in \Gamma^{ei}$.

Avec cette approximation par morceaux constants, la contribution de Γ^{ei} à l'intensité en amplitude s'écrit

$$\lambda^{ei}(A) = |\Omega^e| \Delta T^i \dot{d}^{ei} \tilde{\lambda}(A, d^{ei}), \quad (8)$$

où $|\Omega^e|$ désigne le volume de l'élément Ω^e . L'intensité totale pour l'ensemble de la structure pendant le pas de temps ΔT^i est obtenue en sommant sur tous les éléments :

$$\lambda_{\text{tot}}^i(A) = \sum_e \lambda^{ei}(A). \quad (9)$$

2.5 Choix d'une loi exponentielle pour $\tilde{\lambda}$

L'objectif est de définir une expression explicite pour $\tilde{\lambda}(A, d)$, en prenant en compte le fait que nous traitons des émissions dont le nombre et la magnitude augmentent avec l'endommagement [17]. Nous choisissons de modéliser la dépendance en amplitude par une loi exponentielle. Nous postulons donc :

$$\tilde{\lambda}(A, d(x, t)) = \exp\left(-\frac{A}{A^*(d(x, t))}\right) f(d(x, t)) \quad (10)$$

où $A^*(d)$ est une amplitude caractéristique dépendant de d , et $f(d)$ un préfacteur contrôlant le niveau global de l'intensité.

Afin d'introduire une intensité du PPP de référence λ^0 et de garantir une structure simple, nous choisissons

$$f(d(x, t)) = \frac{\lambda^0}{A^*(d(x, t))}. \quad (11)$$

En reportant dans (10), on obtient

$$\tilde{\lambda}(A, d(x, t)) = \frac{\lambda^0}{A^*(d(x, t))} \exp\left(-\frac{A}{A^*(d(x, t))}\right). \quad (12)$$

La quantité $A^*(d)$ est choisie comme une fonction polynomiale simple du dommage :

$$A^*(d(x, t)) = A^0 [d(x, t)]^p + B^0, \quad (13)$$

où A^0 , B^0 et p sont des paramètres à identifier.

2.6 Interprétation des paramètres λ^0 , A^0 et B^0

Le modèle introduit trois paramètres clés dans la description de l'intensité en amplitude :

— **Rôle de λ^0 .**

Le paramètre λ^0 intervient comme un facteur global dans $\tilde{\lambda}$ via (12). Pour un état d'endommagement donné d , il fixe le *niveau moyen* d'activité d'EA. En doublant λ^0 , on double le nombre moyen d'événements attendus, sans changer la forme de la distribution en amplitude.

— **Rôle de B^0 .**

En l'absence d'endommagement (ou pour $d \approx 0$), on a $A^*(0) = B^0$. Le paramètre B^0 représente donc l'échelle d'amplitude caractéristique lorsque le matériau est peu endommagé. Un B^0 élevé conduit à des amplitudes typiquement plus grandes dès les premiers événements, tandis qu'un B^0 faible favorise une distribution concentrée sur des amplitudes modestes.

— **Rôle de A^0 et de l'exposant p .**

Le terme $A^0 d^p$ dans (13) décrit la façon dont l'échelle d'amplitude $A^*(d)$ augmente avec le dommage. Plus A^0 est grand, plus la distribution en amplitude se déplace vers des amplitudes élevées lorsque d croît : les événements d'EA deviennent en moyenne plus énergétiques au fur et à mesure que l'endommagement progresse.

En résumé, λ^0 contrôle principalement le *nombre* d'événements par unité de dommage, tandis que A^0 et B^0 contrôlent la *magnitude typique* des amplitudes d'EA et leur évolution avec l'endommagement.

2.7 Génération numérique du PPP en amplitude

La génération numérique d'un PPP non homogène en amplitude repose sur la notion de fonction d'intensité cumulée. On définit, pour un pas de temps donné, l'intensité totale (voir équations 9, 10, 11, 13)

$$\tilde{\lambda}^{ei}(A) = \frac{\lambda^0}{A^*(d^{ei})} \exp\left(-\frac{A}{A^*(d^{ei})}\right), \quad x \in \Omega^e, t \in \Delta T^i. \quad (14)$$

$$\hat{\lambda}(A) = \sum_{e=1}^{N_e} |\Omega^e| \Delta T^i d^{ei} \tilde{\lambda}^{ei}(A) \quad (15)$$

où N_e est le nombre d'éléments. La fonction cumulée associée est

$$m(A) = \int_0^A \hat{\lambda}(A') dA' = \sum_{e=1}^{N_e} |\Omega^e| \Delta T^i d^{ei} \lambda^0 \left(1 - \exp\left(-\frac{A}{A^*(d^{ei})}\right) \right). \quad (16)$$

La méthode standard de transformation de l'intensité cumulée est alors appliquée :

1. on génère un processus de Poisson homogène d'intensité unité sur la droite positive.
2. pour chaque u_i dans la plage utile, on calcule l'amplitude correspondante A_i en résolvant $m(A_i) = u_i$.

2.8 Simulation Numérique

Le couplage EF–EA : à chaque pas, les champs d'endommagement sont projetés, l'intensité cumulée est calculée, puis l'algorithme de transformation génère des amplitudes d'EA cohérentes avec l'état simulé

2.9 Vraisemblance et identification des paramètres

Étant donné un ensemble d'événements d'EA observés au capteur k au cours d'un essai, caractérisés par leurs amplitudes $\{A_j\}$ et leurs instants $\{t_j\}$, le PPP non homogène défini par $\lambda_k(A, t)$ admet la log-vraisemblance standard

$$\log \mathcal{L}(\theta) = \sum_j \log \lambda_k(A_j, t_j; \theta) - \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \int_{A_{\min}}^{A_{\max}} \lambda_k(A, t; \theta) dA dt, \quad (17)$$

où θ regroupe l'ensemble des paramètres inconnus du modèle d'EA (par exemple λ_0, A^0, B^0, p).

3 Génération numérique du PPP et champs d'endommagement

3.1 Simulation de deux champs d'endommagement

On considère deux champs d'endommagement indépendants : la perte de rigidité dans la direction des fibres d_1 et la perte de rigidité transverse d_2 . À partir des champs d_m et de leurs vitesses \dot{d}_m , l'activité d'émission acoustique est modélisée par la superposition de deux processus ponctuels de Poisson (PPP) non homogènes, chacun associé à une variable d'endommagement. Les paramètres utilisés dans les simulations sont $\lambda_1^0 = 80, B_1^0 = 2, A_1^0 = 95, p_1 = 1$ et $\lambda_2^0 = 100, B_2^0 = 2, A_2^0 = 80, p_2 = 1$.

Pour chaque variable $m \in \{1, 2\}$, l'intensité en amplitude s'écrit

$$\hat{\lambda}_m(A) = \sum_{e=1}^{N_e} |\Omega^e| \Delta T^i \dot{d}_m^{ei} \tilde{\lambda}_m^{ei}(A) \quad (18)$$

Cette distinction est introduite dans le modèle en autorisant des lois d'amplitude différentes pour chaque variable. Dans cette interprétation, d_2 est principalement associé à des mécanismes dominés par la matrice, généralement caractérisés par des événements d'amplitude faible à moyenne, tandis que d_1 est associé à des mécanismes dominés par les fibres (endommagement longitudinal pouvant conduire à la rupture fibre), susceptibles de générer des émissions de plus forte amplitude. Dans le cadre des méso-modèles au niveau du pli, les variables d_1 et d_2 doivent toutefois être interprétées comme des variables internes effectives décrivant les dégradations de rigidité dominantes. La description reste ainsi partiellement agrégée : certains mécanismes importants ne sont pas explicitement modélisés dans les variables considérées, en particulier le délaminage et la décohésion fibre–matrice, et l'émission acoustique est ici caractérisée uniquement par l'amplitude. Cette simplification constitue une limitation du cadre actuel et motive les perspectives d'extension vers (i) l'introduction de modes d'endommagement supplémentaires, et (ii) l'enrichissement des descripteurs d'EA (énergie, durée, contenu fréquentiel) afin de renforcer la séparabilité mécanistique. La figure 2 illustre un exemple de champs d'endommagement obtenus, tandis que la figure 3 montre les émissions que l'on peut générer à partir de ce processus.

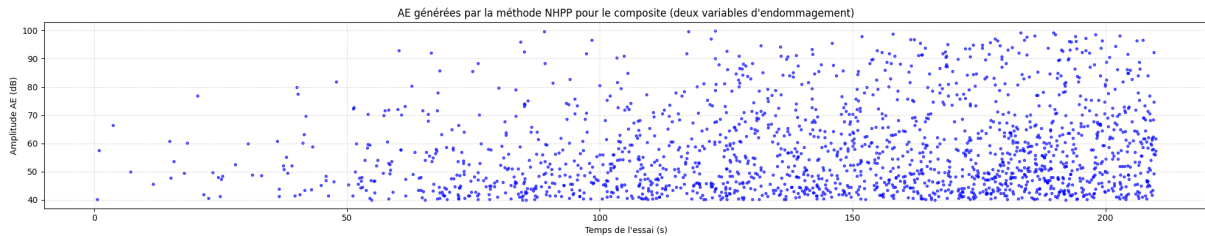


FIGURE 3 – Amplitudes acoustiques générées à partir des champs d'endommagement résolus par le modèle mécanique .

4 Comparaison simulation-essai

4.1 Essai de traction et projection des résultats numériques

L'essai de traction monotone est réalisé à une vitesse de 2 mm/min, en couplant la machine de traction à un système d'EA et à un dispositif de corrélation d'images. On enregistre la contrainte, la déformation et les émissions acoustiques au cours du temps. La Figure 4 présente la courbe contrainte-déformation globale.

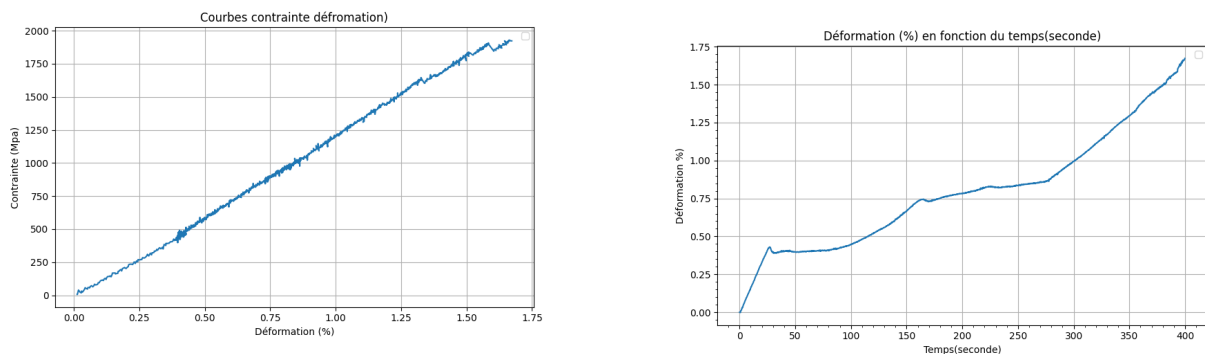


FIGURE 4 – Courbe contrainte-déformation du Composites carbone thermoplastiques unidirectionnels et déformation en fonction du temps (seconde) du Composites carbone thermoplastiques unidirectionnels.

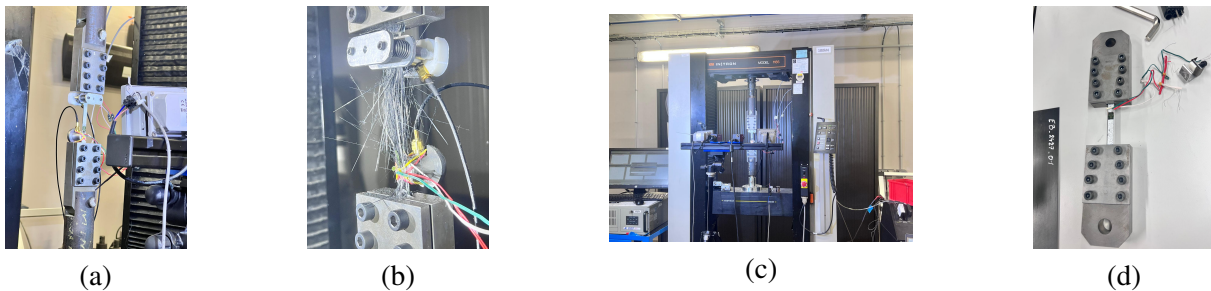


FIGURE 5 – Montage d'essai de traction.

Le comparaison entre modèle et essai est établi via la déformation temps . Le modèle numérique fournit, à chaque pas de temps, la déformation simulée et les émissions EA simulées (amplitudes et indices de pas de temps). Pour comparaison avec l'essai, la déformation est utilisée comme variable de référence :

- pour chaque pas simulé, on cherche la fenêtre expérimentale de déformation la plus proche ;
- on associe à cette fenêtre le temps réel correspondant.

Les événements simulés sont ainsi projetés dans l'axe de temps de l'essai, et décrits par une amplitude et un temps réel, directement comparables aux émissions mesurées. La Figure 6 présente un exemple de chroniques d'EA simulées après projection, et la Figure 7 illustre une comparaison qualitative entre émissions simulées et mesurées.

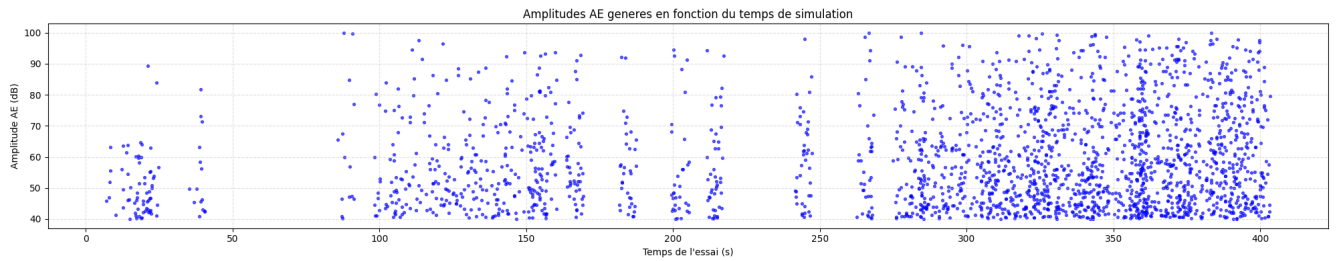


FIGURE 6 – Exemple d’émissions acoustiques générées et projetées en temps réel durant l’essai.

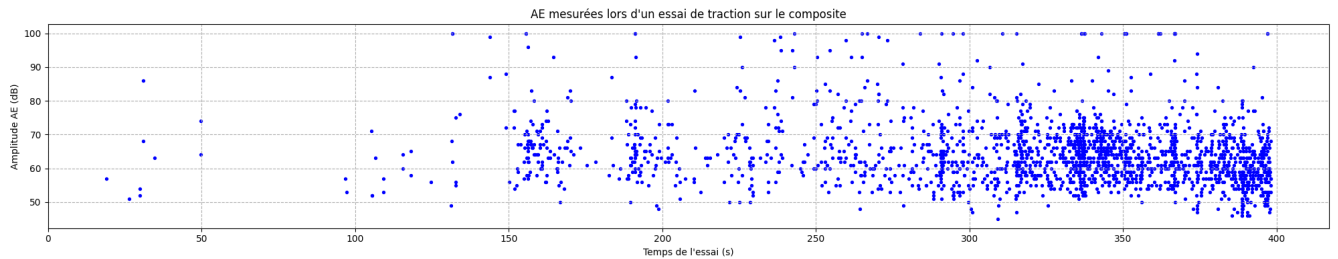


FIGURE 7 – Exemple d’émissions acoustiques réels de l’essai mesurs de l’essai.

4.2 Discussion des écarts simulation-essai

Les Figures 7 et 8 montrent l’évolution des amplitudes en fonction du temps, pour la simulation et pour l’essai. Dans les deux cas, les amplitudes se situent entre 40 et 100 dB sur une durée d’environ 400 s, avec peu d’activité au début puis une forte densité d’événements en fin d’essai : le modèle reproduit donc la tendance globale d’augmentation du taux d’émissions lorsque le stratifié est fortement endommagé. Le recalage simulation–essai est réalisé à partir de la réponse contrainte–déformation avec une erreur d’environ 10 % sur les sollicitations. En revanche, la cinétique diffère : la simulation présente des paquets d’événements séparés par des plages sans activité (effet direct de l’hypothèse $\lambda \propto d$), alors que l’essai montre une activité plus continue avec une « base » de signaux de faible amplitude.

Globalement, la comparaison est satisfaisante au niveau statistique (nombre total d’événements et ordre de grandeur des amplitudes cohérents), mais la correspondance n’est pas stricte événement par événement. Ces écarts tiennent notamment à l’absence de modélisation de la propagation–atténuation (certains événements simulés deviennent indétectables au capteur) et à la présence d’artefacts expérimentaux (bruit de fond, glissement dans les mors, jeux mécaniques, couplage capteur/pièce), ainsi qu’à des mécanismes d’endommagement non pris en compte, en particulier le délaminage. La comparaison doit donc être interprétée en priorité à un niveau statistique ; l’introduction d’un modèle de propagation–atténuation et la prise en compte explicite du délaminage et des sources de bruit constituent des perspectives pour améliorer le réalisme du jumeau numérique. Un calibrage plus systématique des paramètres et la validation sous différents chemins de chargement (fatigue, chargements cycliques) permettront d’évaluer la robustesse du jumeau numérique proposé, pensé comme un outil de surveillance de la santé structurale capable de reproduire simultanément l’évolution de la réponse mécanique et de l’activité d’EA.

5 Conclusion

Cet article présente un cadre de modélisation *basé sur un modèle* pour la description statistique de l’émission acoustique dans des stratifiés CFRP thermoplastiques. L’approche couple un modèle d’endommagement continu à mésoéchelle, avec un processus ponctuel de Poisson non homogène dont l’intensité dépend explicitement de l’état d’endommagement d et de sa vitesse d’évolution \dot{d} . Le modèle mécanique, résolu par éléments finis, fournit des champs d’endommagement locaux qui alimentent le modèle des émissions acoustiques et permettent de générer des chroniques d’événements cohérentes en ordre de grandeur avec les mesures expérimentales. La loi exponentielle retenue pour la distribution en

amplitude, paramétrée par (λ_0, A_0, B_0, p) , permet de contrôler séparément le nombre d'événements par unité de dommage et la magnitude typique des amplitudes. La comparaison qualitative entre simulation et essai montre une bonne cohérence globale au niveau statistique (nombre d'événements, niveaux d'amplitude), tout en mettant en évidence les limites du cadre actuel, en particulier l'absence de modélisation de la propagation-atténuation des ondes, du bruit de fond expérimental et de certains mécanismes d'endommagement comme le délaminage.

Les développements futurs porteront sur l'extension du modèle à d'autres caractéristiques de signal (énergie, durée, contenu fréquentiel), sur l'intégration d'un modèle de propagation-atténuation dans la structure, ainsi que sur la prise en compte explicite de modes d'endommagement supplémentaires. Dans ce cadre, la vraisemblance associée au processus ponctuel de Poisson non homogène sera exploitée pour estimer de manière cohérente les paramètres statistiques par maximum de vraisemblance à partir de séries d'essais instrumentés en EA. Un calibrage plus systématique des paramètres et la validation sous différents chemins de chargement (fatigue, chargements cycliques) permettront d'évaluer la robustesse du jumeau numérique proposé dans un contexte de surveillance de santé structurale.

Références

- [1] R. S. M. Almeida, M. D. Magalhães, M. N. Karim, K. Tushtev, K. Rezwani, "Identification des mécanismes d'endommagement des composites par émission acoustique et apprentissage automatique supervisé," *Materials & Design*, 2023.
- [2] L. Marcin, "Modélisation du comportement, de l'endommagement et de la rupture de matériaux composites à renforts tissés pour le dimensionnement robuste de structures," 2010.
- [3] K. Asamene, L. Hudson, M. Sundaresan, "Influence de l'atténuation sur les signaux d'émission acoustique dans les panneaux en polymère renforcé de fibres de carbone," *Ultrasonics*, vol. 59, pp. 86–93, 2015.
- [4] S. Huguet, N. Godin, R. Grtner, L. Salmon, D. Villard, "Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester," *Composites Science and Technology*, vol. 62, pp. 1433–1444, 2002.
- [5] N. Godin, P. Reynaud, G. Fantozzi, "Challenges and Limitations in the Identification of Acoustic Emission Signature of Damage Mechanisms in Composite Materials," *Applied Sciences*, vol. 8, no. 8, 1267, 2018.
- [6] N. Godin, P. Reynaud, G. Fantozzi, *Acoustic Emission and Durability of Composite Materials*, Wiley–ISTE, 2018.
- [7] M. Sedifar, D. Zarouchas, "Damage characterization of laminated composites using acoustic emission : A review," *Composites Part B : Engineering*, vol. 195, 108039, 2020.
- [8] C. Barile, C. Casavola, G. Pappalettera, P.K. Kumar, "Damage characterization in composite materials using acoustic emission signal-based and parameter-based data," *Composites Part B : Engineering*, 2019.
- [9] E. Lainé *et al.*, "Acoustic emission description from a damage and failure mechanical model at the meso-scale," *Mechanics & Industry*, 2020.
- [10] A. Thionnet, *From Fracture to Damage Mechanics : A Behavior Law for Microcracked Composites Using the Concept of Crack Opening Mode*, *Composite Structures*, vol. 92, no. 3, pp. 780–794, 2010.
- [11] F. Laurin, N. Carrère, C. Huchette, J.-F. Maire, *A Multiscale Hybrid Approach for Damage and Final Failure Predictions of Composite Structures*, *Journal of Composite Materials*, vol. 47, no. 20–21, pp. 2713–2747, 2013.
- [12] E. Abisset, *Un mésomodèle d'endommagement des composites stratifiés pour le virtual testing : identification et validation*, Thèse de doctorat, École normale supérieure de Cachan, France, 2012.
- [13] M. Trovalet, P. Ladeveze, G. Lubineau, *A Multiscale Damage Model for Analysis of Laminated Composites at the Micro Scale*, Proc. 8th World Congress on Computational Mechanics (WCCM8) and 5th ECCOMAS Congress, Venice, Italy, 2008.
- [14] A. Logg, K.-A. Mardal, G. N. Wells (Eds.), *Automated Solution of Differential Equations by the Finite Element Method : The FEniCS Book*,
- [15] D. J. Daley, D. Vere-Jones, *An Introduction to the Theory of Point Processes, Volume I : Elementary Theory and Methods*, 2nd ed., Springer, 2003, doi :10.1007/b97277.
- [16] D. L. Snyder, M. I. Miller, *Random Point Processes in Time and Space*, 2nd ed., Springer, 1991, doi :10.1007/978-1-4612-3166-0.
- [17] R. S. M. Almeida, M. D. Magalhães, M. N. Karim, K. Tushtev, K. Rezwani, *Identification of damage mechanisms in composites using acoustic emission and supervised machine learning*, *Materials & Design*, 228 (2023) 111812, doi :10.1016/j.matdes.2023.111812.