Académie de Nantes
Ecole Doctorale de l'Université du Maine
Le Mans, France

thèse de doctorat
Spécialité : Acoustique

Présentée par

Anne Marec

pour obtenir le titre de Docteur de l'Université du Maine

Contrôle de santé des matériaux hétérogènes par émission acoustique et acoustique non linéaire : Discrimination des mécanismes d'endommagement et estimation de la durée de vie restante

soutenue le 17 novembre 2008 devant le jury composé de

D. Brie, Professeur, CRAN, Université Henri Poincaré (Rapporteur)
M. Benzeggagh, Professeur, Centre de Recherche Royallieu, UTC (Rapporteur)
C. Depollier, Professeur, LAUM, Université du Maine (Examinateur)
M.-A. de Smet, Airbus Toulouse (Examinateur)
L. Gaillet, Chargé de Recherche, LCPC Nantes (Examinateur)
V. Tournat, Chargé de Recherche, LAUM, Université du Maine (Examinateur)
R. El Guerjouma, Professeur, LAUM, Université du Maine (Directeur de thèse)
J.-H. Thomas, Maître de Conférences, LAUM, Université du Maine (Co-directeur de thèse)

Table des matières

Table des matières i

Table des figures v

Liste des tableaux xi

Liste des principales notations xiii

Introduction générale 1

1 Emission Acoustique (EA) : état de l'art et problématique 5
1.1 Matériaux composites et essais mécaniques . . . 5
1.1.1 Présentation des matériaux composites . . . 5
1.1.1.1 Matériaux composites de type fibre/matrice . . . 6
1.1.1.2 Matériaux composites de type béton polymère . . . 7
1.1.2 Sollicitations mécaniques . . . 8
1.2 Mécanismes d'endommagement des matériaux composites . . . 9
1.2.1 Matériaux composites de type fibre/matrice . . . 9
1.2.2 Influence de la direction de sollicitation sur les modes de rupture . . . 10
1.2.3 Matériaux composites de type béton polymère . . . 11
1.3 Emission Acoustique . . . 12
1.3.1 Présentation de l'EA . . . 12
1.3.2 Effet Kaiser et rapport Felicity . . . 13
1.3.3 Méthode d'acquisition des signaux d'EA . . . 13
1.3.3.1 Transducteurs utilisés pour l'EA . . . 13
1.3.3.2 Chaîne d'acquisition de l'EA . . . 14
1.3.3.3 Paramétrage du logiciel d'acquisition . . . 14
1.3.4 Paramètres temporels . . . 15
1.4 Identification des sources d'EA dans les matériaux composites . . . 17
1.4.1 Analyse temporelle . . . 17
1.4.2 Analyse fréquentielle et temps-fréquence . . . 20
1.4.3 Analyse statistique multivariable . . . 21
1.5 Problématique et méthodologie . . . 23

2 Analyse statistique multivariable **25**
2.1 Définition du problème de classification . . . 25
2.2 Classification supervisée et non supervisée . . . 26
2.3 Partition classique et partition floue . . . 27
2.4 Choix des descripteurs . . . 28
2.5 Mesure de similitudes entre les formes . . . 28
2.6 Méthode de coalescence floue (Fuzzy C-means FCM) . . . 29
2.7 Evaluation du nombre de classes à prendre en compte . . . 30
2.8 Algorithme de coalescence floue . . . 31
2.9 Critères d'arrêt . . . 32
2.10 Décision sur l'appartenance à une classe . . . 33
2.11 Etiquetage des classes . . . 35
2.12 Analyse en composantes principales . . . 35
2.13 Conclusion . . . 37

3 Résultats : Discrimination des mécanismes d'endommagement par EA **39**
3.1 Procédure expérimentale . . . 39
3.2 Application aux matériaux composites de type matrice/fibre . . . 41
3.2.1 Essais de traction sur des composites unidirectionnels . . . 41
3.2.1.1 Evaluation du nombre de classes à prendre en compte . . . 41
3.2.1.2 Choix des descripteurs . . . 43
3.2.1.3 Analyse statistique multivariable et étiquetage des classes . . . 44
3.2.2 Essais de fluage en traction sur des composites à plis croisés et SMC . . . 47
3.2.2.1 Evaluation du nombre de classes à prendre en compte . . . 49
3.2.2.2 Analyse statistique multivariable . . . 49
3.2.3 Essais de flexion quasi statique trois points sur des composites à plis croisés et SMC 51
3.2.3.1 Evaluation du nombre de classes à prendre en compte . . . 53
3.2.3.2 Analyse statistique multivariable . . . 53
3.3 Application aux matériaux composites de type béton polymère . . . 55
3.3.1 Echantillon composé de résine . . . 56
3.3.2 Echantillon composé de gravier et de résine . . . 56
3.3.3 Echantillon composé de sable fin et de résine . . . 59
3.3.4 Echantillon de béton polymère . . . 61
3.4 Conclusion . . . 69

4 Etude temps-échelle des signaux d'EA issus des matériaux composites **71**
4.1 Présentation de l'étude temps-échelle . . . 72
4.1.1 Problématique . . . 72
4.1.2 Signaux d'émission acoustique étudiés . . . 73
4.2 Transformées en ondelettes continues (TOC) . . . 74
4.3 Transformées en ondelettes discrètes (TOD) . . . 76
4.4 Analyse multirésolution . . . 77
4.5 Ondelettes analysantes . . . 79
4.6 Application des TOC aux signaux d'EA . . . 83

4.7 Définition de nouveaux descripteurs à partir des TOC 84
4.8 Application des TOD aux signaux d'EA 86
4.9 Définition de nouveaux descripteurs à partir des TOD 87
4.10 Application des descripteurs temps-échelle à l'analyse statistique multivariable 89
4.10.1 Validation de la méthode sur des matériaux modèles 90
4.10.2 Application aux matériaux composites à plis croisés 90
4.10.3 Application aux matériaux composites SMC 93
4.11 Conclusion 95

5 Caractérisation expérimentale de dynamique lente non-linéaire et EA 97
5.1 Méthode de résonance non linéaire 98
5.1.1 Méthode de résonance 98
5.1.2 Dynamique rapide 99
5.1.3 Dynamique lente 99
5.2 Paramètres non-linéaires 101
5.3 Procédure expérimentale 101
5.4 Résultats : dynamique lente non-linéaire et émission acoustique 103
5.4.1 Emission acoustique 103
5.4.2 Effet Kaiser 104
5.4.3 Suivi du temps de relaxation 106
5.5 Conclusion 109

Conclusion générale 111

Bibliographie 115

Résumé 121

Table des figures

1.1 Catégories de matériaux composites à fibres selon le type de renfort et leur arrangement. . 7
1.2 Micrographies des éléments constitutifs du béton polymère : (a) sable fin. (b) granulat. . . 8
1.3 Courbe de comportement des matériaux hétérogènes. 9
1.4 Essai de fluage : (a) contrainte appliquée σ_0. (b) Réponse en déformation $\epsilon(t)$ et taux de déformation $d\epsilon/dt$. 9
1.5 Matériaux composites composés de résine renforcée par des fibres de verre et principaux modes d'endommagement. 10
1.6 Différents types d'endommagement dans un matériau hétérogène de type béton polymère. 11
1.7 Dispositif de mesure d'émission acoustique. 12
1.8 Paramètres d'acquisition des salves d'EA : PDT (Peak Definition Time), HDT (Hit Definition Time) et HLT (Hit Lockout Time). 15
1.9 Salve typique d'émission acoustique et principaux paramètres temporels. 16
1.10 Caractéristiques des signaux de type A, B, C, D identifiés par Huguet *et al.* [3]. 19

2.1 Identification par coalescence floue : illustration à deux classes dont les centres sont C_1 et C_2. Les formes x_j sont associées aux deux classes ω_1 et ω_2 avec une règle d'appartenance u_i. Chaque forme x_j appartient à chacune des classes avec des valeurs d'appartenance $u_i(x_j)$ comprises entre 0 et 1. 29
2.2 Illustration de l'ACP : le nuage de points initialement représenté dans un espace de dimension 3 (à gauche) est projeté par ACP dans un plan (à droite) dans lequel la séparation des formes en deux classes atteste de la pertinence des composantes des formes. 37
2.3 Visualisation par ACP des classes obtenues par coalescence floue. La classification n'étant pas visualisable dans un espace de dimension d, chaque forme x_j définie à gauche est projetée en y_j par ACP dans un espace de dimension inférieure à droite permettant de visualiser la structuration en classes donnée par l'algorithme de coalescence. 37

3.1 Composite multicouche à plis croisés, matrice époxy et renforts fibres de verre : (a)Signaux typiques de la fissuration matricielle et du délaminage. (b)Signaux typiques de la décohésion interface fibre-matrice et de rupture de fibre. Ces signaux contiennent 2048 points échantillonnés à 5MHz. 40
3.2 Dimensions des éprouvettes de composites unidirectionnels à 45° et position des capteurs d'EA pour un essai de traction quasi statique (vue de haut). Les flèches indiquent la direction de sollicitation en traction. 42

3.3 Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : (a) distribution d'amplitude des salves d'EA. (b) dispositif de mesure. 42
3.4 Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : indices de validité des classes. . 43
3.5 Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : visualisation par ACP des contributions des descripteurs sur les deux premiers axes : la première composante a une variance de 61.24% par rapport à la variance totale et la deuxième a une variance de 19.57% par rapport à la variance totale. 44
3.6 Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : visualisation par ACP des contributions des descripteurs sur les deux premiers axes : la première composante a une variance de 61.24% par rapport à la variance totale et la deuxième a une variance de 19.57% par rapport à la variance totale. 44
3.7 Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par application de l'algorithme de classification aux données. 45
3.8 Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : Valeurs propres en pourcentage en fonction du nombre de descripteurs utilisés pour l'ACP. 46
3.9 Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue avec les descripteurs temporels (86% d'informations sauvegardées). 47
3.10 Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : chronologie d'apparition des deux mécanismes d'endommagement pendant l'essai. 47
3.11 Dimensions des éprouvettes de composites à plis croisés $[\pm 62°]_{12}$ et de SMC, position des capteurs d'EA pour un essai de fluage (vue de haut). 48
3.12 Déformation appliquée et amplitude des salves d'EA lors d'essais de fluage : (a) échantillon de composite à plis croisés orientés à $[\pm 62°]_{12}$. (b) échantillon de composite SMC. 48
3.13 Indices de validité des classes : (a) Essai de fluage sur un composite à plis croisés orientés à $[\pm 62°]_{12}$. (b) Essai de fluage sur un composite SMC. 49
3.14 Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue avec les descripteurs temporels : (a) échantillon de composite à plis croisés orientés à $[\pm 62°]_{12}$ (82% d'informations sauvegardées). (b) échantillon de composite SMC (89% d'informations sauvegardées). 50
3.15 Chronologie d'apparition des différents mécanismes d'endommagement pendant des essais de fluage : (a) échantillon de composite à plis croisés orientés à $[\pm 62°]_{12}$. (b) échantillon de composite SMC. 51
3.16 Echantillon de composite à plis croisés orientés à $[\pm 62°]_{12}$ sollicité en fluage : réponse en déformation et nombre de salves cumulées correspondant à la microfissuration matricielle. 51
3.17 Dimensions des éprouvettes de composites à plis croisés $[90°0°]_8$ et de SMC, position des capteurs d'EA pour un essai de flexion quasi statique trois points (vue de haut). 52
3.18 Déformation appliquée et amplitude des salves d'EA lors d'essais de flexion quasi statique trois points : (a) échantillon de composite à plis croisés $[90°0°]_8$. (b) échantillon de composite SMC. 52
3.19 Indices de validité des classes : (a) Essai de flexion quasi statique trois points sur un composite à plis croisés orientés à $[90°0°]_8$. (b) Essai de flexion quasi statique trois points sur un composite SMC. 53

3.20 Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue avec les descripteurs temporels : (a) échantillon de composite à plis croisés orientés à $[90°0°]_8$ (86% d'informations sauvegardées). (b) échantillon de composite SMC (93% d'informations sauvegardées). 54
3.21 Chronologie d'apparition des différents mécanismes d'endommagement pendant des essais de flexion quasi statique trois points : (a) échantillon de composite à plis croisés orientés à $[90°0°]_8$. (b) échantillon de composite SMC. 54
3.22 Géométrie des éprouvettes et position des capteurs d'émission acoustique. 55
3.23 Essais de flexion quasi statique trois points : (a) Béton à base polymère. (b) Résine. . . . 56
3.24 Force appliquée et amplitude des salves lors d'un essai de flexion quasi statique trois points sur un échantillon de résine. 57
3.25 (a) Photographie de la zone de rupture d'un échantillon composé de résine pure. (b) Micrographie électronique de l'endommagement matriciel présent au niveau de la zone de rupture d'un échantillon composé de résine pure. 57
3.26 Force appliquée et amplitude des salves lors d'un essai de flexion quasi statique trois points sur un échantillon composé de granulats et de résine. 58
3.27 Distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par classification : échantillon composé de granulats et de résine. 58
3.28 Chronologie d'apparition des trois types d'endommagement identifiés sur un échantillon composé de granulats et de résine. 59
3.29 Micrographie d'une rupture de granulat observée au niveau de la zone de rupture d'un échantillon composé de gravier et de résine. 59
3.30 Photographie des trois mécanismes d'endommagement présents dans les échantillons composés de résine et granulats au niveau de la zone de rupture. L'image de gauche montre la zone de rupture en coupe des deux parties de l'éprouvette. On peut voir qu'un granulat s'est brisé à l'intérieur de l'éprouvette. L'image de droite présente une vue de dessus de la zone de rupture avec les deux parties de l'éprouvette accolées. On peut observer la décohésion entre la résine et un granulat présent en surface de l'éprouvette. 60
3.31 Force appliquée et amplitude des salves lors d'un essai de flexion quasi statique trois points sur un échantillon composé de sable fin et de résine. 60
3.32 Distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par classification : échantillon composé de sable fin et de résine. 61
3.33 Chronologie d'apparition des trois types d'endommagement identifiés sur un échantillon composé de sable fin et de résine. 61
3.34 Micrographie électronique de la zone de rupture d'un échantillon composé de sable fin et de résine : décohésions sable/résine et fissurations de la matrice à différentes échelles : (a) 500 microns. (b) 100 microns. 62
3.35 Force appliquée et amplitude des salves lors d'un essai de flexion quasi statique trois points sur un échantillon de béton polymère. 62
3.36 Visualisation par ACP des classes obtenues par la classification : échantillon de béton polymère. 63
3.37 Distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par classification : échantillon de béton polymère. 63

3.38 (a)Photographie de la zone de rupture d'un échantillon de béton polymère en vue de dessus avec les deux parties de l'éprouvette accolées. On peut voir la rupture d'un granulat en surface de l'éprouvette. (b) Micrographie de la zone de rupture d'un échantillon de béton polymère à l'échelle de 500 microns. 64
3.39 Photographie des trois mécanismes d'endommagement présents au niveau de la zone de rupture dans les échantillons de bétons polymères. Les deux images montrent une vue de dessus de la zone de rupture avec les deux parties de l'éprouvette accolées. 64
3.40 Chronologie d'apparition des trois types d'endommagement identifiés sur un échantillon de béton polymère. 65
3.41 Signaux d'EA identifiés dans les différents échantillons correspondant aux microfissurations matricielles : signaux de type A. 66
3.42 Signaux d'EA identifiés dans les différents échantillons correspondant aux décohésions interfaciales : signaux de type B. 67
3.43 Signaux d'EA identifiés dans les différents échantillons correspondant aux ruptures de granulats : signaux de type C. 68

4.1 Pavage temps-fréquence et temps-échelle pour la transformée en ondelettes. a représente le facteur d'échelle. Les petites échelles correspondent à des hautes fréquences et inversement les grandes échelles correspondent à des basses fréquences. 72
4.2 Exemples de signaux typiques d'EA : signal de type A représentatif d'une microfissuration matricielle, signal de type B représentatif d'une décohésion interfaciale fibre-matrice, signal de type C représentatif d'une rupture de fibre. 73
4.3 Modèle graphique du calcul du coefficient d'ondelette. (a) $f(t)$ est le signal à analyser. (b) $\psi_{a,b}$ est l'ondelette analysante. (c) L'ondelette est centrée sur une valeur b de l'axe des temps et le signal $f(t)$ est multiplié par les valeurs de l'ondelette analysante. (d) L'aire du signal est égale au coefficient d'ondelette correspondant à la fréquence $1/a$ et de position b. L'aire est comptée positivement pour les parties de la courbe situées au-dessus de l'axe des abscisses (noir) et négativement dans le cas opposé (gris foncé). 75
4.4 Décomposition du signal *f(t)* en une approximation (A_1) et un détail (D_1). 79
4.5 Décomposition du signal *f(t)* sur trois niveaux avec les intervalles de fréquences correspondants (f_e est la fréquence d'échantillonnage du signal). 80
4.6 Chapeau mexicain et ondelette de Morlet. 82
4.7 Ondelettes de Daubechies avec 4 et 10 moments s'annulant : db4 et db10. 82
4.8 Représentation temps-échelle issue d'une TOC : (a) Signal de type A représentatif d'une microfissuration matricielle. (b) Signal de type B représentatif d'une décohésion fibre-matrice. (c) Signal de type C représentatif d'une rupture de fibre. Ces représentations exhibent le module des coefficients d'ondelette. 83
4.9 Transformées en ondelettes croisées : (a) entre deux signaux de type A. (b) entre deux signaux de type B. (c) entre un signal de type A et un signal de type B. 85
4.10 Décompositions obtenues par TOD sur cinq niveaux : le signal S du bas correspond au signal d'origine, les signaux notés D1 à D5 sont les détails correspondant aux différents niveaux de décomposition. (a) Signal S de type A (microfissuration matricielle). (b) Signal S de type B (décohésion). (c) Signal S de type C (rupture de fibre). 87

4.11 Module de la transformée de Fourier du signal (S) et de chaque niveau de décomposition (D1 à D5). (a) Signal S de type A (microfissuration matricielle). (b) Signal S de type B (décohésion). (c) Signal S de type C (rupture de fibre). 88

4.12 Utilisation des descripteurs temps-échelle : (a) Visualisation par ACP des formes (92% d'informations sauvegardées). (b) Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue (92% d'informations sauvegardées). Utilisation des descripteurs temporels : (c) Visualisation par ACP des formes (93% d'informations sauvegardées). (d) Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue (93% d'informations sauvegardées). 91

4.13 Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue avec les descripteurs temps-échelle et temporels (84% d'informations sauvegardées). 92

4.14 Force appliquée et amplitude des salves d'EA pour un composite à plis croisés sollicité en flexion quasi quasi statique trois points. 92

4.15 Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue sur un composite à plis croisés sollicité en flexion quasi statique trois points : (a) Utilisation des descripteurs temps-échelle (80% d'informations sauvegardées). (b)Utilisation des descripteurs temporels (90% d'informations sauvegardées). 93

4.16 Composite à plis croisés sollicité en flexion quasi statique trois points : chronologie d'apparition des deux classes de signaux pendant l'essai. 93

4.17 Force appliquée et amplitude des salves d'EA pour un composite SMC sollicité en flexion quasi statique trois points. 94

4.18 Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue sur un composite SMC sollicité en flexion quasi statique trois points : (a) Utilisation des descripteurs temps-échelle (91% d'informations sauvegardées). (b) Utilisation des descripteurs temporels (93% d'informations sauvegardées). 95

4.19 Composite SMC sollicité en flexion quasi statique trois points : chronologie d'apparition des trois classes de signaux pendant l'essai. 95

5.1 Représentation de l'évolution d'une résonance en fonction de l'amplitude d'excitation dans un matériau intact et un matériau endommagé. Chaque courbe correspond à une amplitude d'excitation donnée. 98

5.2 Représentation du décalage en fréquence en fonction de la déformation appliquée. 99

5.3 Evolution des courbes de résonance correspondant au sixième mode de flexion pendant le conditionnement et la relaxation d'un composite SMC endommagé [81]. U.A. correspond à Unité Arbitraire. 100

5.4 Distribution d'amplitude des salves pour les quatre étapes d'endommagement sur le SMC sollicité en flexion trois points : (a) d1. (b) d2. (c) d3. (d) d4. L'étape d1 correspond à un déplacement de 0.4mm, d2 de 0.8mm, d3 de 1.2mm et d4 de 1.6mm. 103

5.5 Energie cumulée des trois types d'endommagement (fissuration matricielle, décohésion interfaciale et rupture de fibre) dans le composite SMC soumis à une flexion quasi statique trois points. Les quatre étapes d'endommagement sont notées d1 à d4. 105

5.6 Evolution de la force appliquée et de l'amplitude des salves en fonction du temps de l'essai pour quatre déplacement en flexion quasi statique trois points : (a) Endommagement d1 correspondant à un déplacement de 0.4 mm. (b) Endommagement d2 : 0.8mm. (c) Endommagement d3 : 1.2 mm. (d) Endommagement d4 : 1.6 mm. 106
5.7 Evolution logarithmique de la fréquence de résonance du sixième mode de flexion pour l'état intact et pour les quatre états endommagés induits par flexion quasi statique trois points [81]. Les quatre étapes d'endommagement sont notées d1 à d4. 108
5.8 Evolution de l'inverse du temps de relaxation en fonction de l'énergie cumulée libérée par le composite SMC à l'état intact et pour chaque étape d'endommagement (d1, d2, d3 et d4) : (a) endommagement global. (b) pour chaque mécanisme d'endommagement identifié (fissuration matricielle, décohésion interfaciale et rupture de fibre). 108

Liste des tableaux

1.1 Synthèse des valeurs d'amplitude de différents mécanismes d'endommagement trouvées dans la littérature obtenues pour différents types de composites soumis à diverses sollicitations mécaniques. 18
1.2 Valeurs de fréquence trouvées dans la littérature traitant de l'analyse du contenu fréquentiel des signaux d'EA de composites soumis à un chargement. 20

2.1 Différentes étapes de classification supervisée et non supervisée. 27
2.2 Algorithme de coalescence floue. 33

3.1 Compositions des échantillons de béton polymère. 40
3.2 Matériaux composites étudiés, essais mécaniques réalisés, vitesses de propagation des ondes mesurées et seuils d'acquisition des signaux d'EA utilisés. 41
3.3 Synthèse des paramètres temporels calculés sur les salves d'EA (avec 2048 points échantillonnés à 5MHz) en fonction du type d'endommagement correspondant pour un composite de type fibre/matrice. 45
3.4 Valeurs propres λ, variances en pourcentages *prcvap* et variances en pourcentages cumulés *prccum* pour chaque descripteur. 46
3.5 Synthèse des paramètres temporels calculés sur les salves d'EA (avec 1024 points échantillonnés à 1MHz) en fonction du type d'endommagement correspondant pour un composite fibre/matrice et un béton polymère. 64
3.6 Tableau récapitulatif des essais effectués et principaux résultats obtenus. 70

4.1 Valeurs du vecteur forme f_6 obtenu en prenant le signal B en référence et calculé pour des signaux typiques de type A et B pour les niveaux de décomposition D3 (312-625 kHz), D4 (156-312 kHz) et D5 (78-156 kHz). 89

5.1 Force et déplacement appliqués pour chaque étape d'endommagement. 101
5.2 Quantification de l'effet kaiser. 106
5.3 Effets du conditionnement sur le décalage fréquentiel et le temps de relaxation. 107
5.4 Valeurs des coefficients a et b correspondant à l'équation 5.7 pour chaque type d'endommagement et pour l'endommagement global. 108

Liste des principales notations

A	amplitude des salves d'EA
T	durée des salves d'EA
$Eabs$	énergie absolue des salves d'EA
$\mathbf{X}$	matrice des données d'EA
d	nombre de descripteurs
n	nombre de formes
x_j $(j=1,n)$	vecteur forme
M	nombre de classes
ω_i $(i=1,M)$	classe
$u_i(x_j)$	valeur d'appartenance de la forme x_j à la classe ω_i
C_i	centre de classe
$\mathbf{U}$	matrice de partition floue
a	facteur d'échelle
b	paramètre de translation
$\psi(t)$	ondelette analysante
$TOC_f(a,b)$	transformée en ondelettes continues d'un signal $f(t)$
j	niveau de décomposition
k	déplacement en temps
$TOD_f(j,k)$	transformée en ondelettes discrètes d'un signal $f(t)$
d_k^j	coefficients des détails
f_r	fréquence de résonance

Introduction générale

Les matériaux composites à matrice organique sont aujourd'hui largement utilisés dans de nombreux domaines industriels (automobile, aéronautique, nucléaire, etc) notamment grâce à l'allègement des structures à propriétés mécaniques égales ou supérieures qu'ils procurent. Un des enjeux est de pouvoir contrôler l'état de santé de ces matériaux en service. Dans la perspective de quantifier l'endommagement des matériaux composites et d'identifier les différents mécanismes sources, les méthodes acoustiques sont intéressantes en raison de leur aspect non destructif et de leur sensibilité à l'endommagement. Une de ces techniques qui s'apparente à une méthode de contrôle non destructif (CND) est l'émission acoustique (EA) [1]. Elle permet de capter l'énergie élastique libérée par les matériaux sous contrainte. Elle présente l'avantage de ne pas nécessiter de signal ultrasonore excitateur, d'être applicable sur une structure en service sous diverses conditions environnementales et de ne pas exiger d'infrastructure lourde. Elle nécessite cependant la mise en charge du matériau ou de la structure pour rendre l'endommagement acoustiquement actif. L'objectif de ce travail de thèse est l'étude des matériaux et de leur endommagement à travers l'analyse et le traitement des données d'EA. Plus précisément nous nous proposons d'identifier à partir des salves d'EA les signatures permettant de caractériser finement les différents mécanismes intervenant durant le processus d'endommagement et ainsi d'identifier les événements précurseurs de la rupture permettant d'estimer la durée de vie restante des matériaux sous contrainte.

Notre étude porte plus particulièrement sur des matériaux composites à base époxy ou polyester utilisés industriellement. Le travail est mené sur des matériaux de complexité croissante : résine époxy, composites unidirectionnels, composites stratifiés à plis croisés, composites Sheet Molding Compound (SMC), bétons polymères. Des essais de traction monotone avec suivi et enregistrement de l'EA ont été réalisés dans un premier temps sur des échantillons modèles (résine, composite unidirectionnel). Puis des essais de fluage en traction et de flexion quasi statique trois points ont été effectués afin de se rapprocher le plus de contraintes mécaniques rencontrées dans des structures industrielles. Des études précédentes ont permis d'identifier les signatures acoustiques des principaux modes d'endommagement de matériaux composites modèles : l'endommagement matriciel, la décohésion fibre/matrice et la rupture de fibre. Notre travail concerne ensuite des matériaux réputés plus complexes (SMC, plis-croisés sollicités en fluage, bétons polymères). Ce sont des matériaux composites dont les mécanismes d'endommagement sont moins maîtrisés et il existe peu d'étude sur l'évaluation non destructive quantitative de ces matériaux notamment par émission acoustique.

La plupart des analyses des données d'EA sont généralement basées sur une analyse conventionnelle consistant à visualiser des descripteurs temporels tels que l'amplitude du signal, la durée, l'énergie, etc [2,3]. Une amélioration apportée à cette méthode consiste à envisager tous les descripteurs simultané-

ment par une analyse statistique multivariable [4,5]. L'utilisation simultanée de plusieurs paramètres permet d'améliorer considérablement la discrimination des modes d'endommagement, notamment pour des matériaux complexes. Les caractéristiques intrinsèques des classes de signaux d'EA n'étant pas connues, une classification non-supervisée est employée, situant l'étude dans une démarche récente plus quantitative de l'EA. Toutefois, l'originalité de l'étude proposée se traduit par l'association d'un algorithme de classification de données multidimensionnelles (coalescence floue) et d'une analyse en composantes principales (ACP) [6,7]. Les essais sur des échantillons modèles dont les comportements sous sollicitation sont bien connus (composites unidirectionnels) vont permettre de définir le potentiel de cette méthode d'analyse statistique multivariable, en terme d'identification des mécanismes sources d'EA, de leur initiation et de leur développement jusqu'à la rupture. Ensuite, la méthode proposée est appliquée à des matériaux plus complexes s'approchant de structures réelles (plis croisés, SMC, béton polymère).

Par ailleurs, la plupart des méthodes actuelles sont limitées à l'analyse des paramètres temporels qui ne sont pas toujours pertinents pour caractériser les ondes acoustiques, notamment pour des composites de nature complexe [3]. En effet, les signaux d'EA issus des matériaux composites sont de nature non stationnaire. Les travaux réalisés sur les formes d'onde ont montré qualitativement que l'utilisation d'outils temps-échelle ou temps-fréquence permet d'obtenir des informations supplémentaires sur les signaux d'EA afin de les discriminer [8,9]. Ainsi, une autre originalité de notre travail consiste à utiliser les transformées en ondelettes continues et discrètes afin d'améliorer la reconnaissance des modes d'endommagement des matériaux composites complexes comme celui d'un composite de fabrication industrielle. Plus particulièrement, l'objectif est de pouvoir déterminer de nouveaux descripteurs temps-fréquence ou temps-échelle permettant une caractérisation plus détaillée des salves et par là même de mieux caractériser les mécanismes d'endommagement. Dans cette partie de notre travail, nous avons montré que l'EA permettait de bien caractériser les mécanismes d'endommagement jusqu'à rupture [10].

Il en est de même des méthodes acoustiques ultrasonores linéaires dites actives qui ont démontré leur aptitude à caractériser l'endommagement des matériaux composites [11]. Cependant, plusieurs expériences ont montré que l'EA et les méthodes acoustiques linéaires peuvent ne pas être assez sensibles au tout début des processus d'endommagement diffus ou à un endommagement très localisé. Souvent, les premiers mécanismes d'endommagement sont des précurseurs de la rupture finale et sont de ce fait très importants à identifier. Les méthodes acoustiques non linéaires présentent une alternative intéressante pour détecter et éventuellement caractériser les endommagements faibles ou précoces, localisés ou diffus [11,12]. Ainsi depuis quelques années, l'acoustique non linéaire apparaît de plus en plus comme une nouvelle voie très prometteuse pour le contrôle et l'évaluation non destructive des matériaux de structure. Plus particulièrement, des phénomènes non linéaires associés à la présence d'endommagement ont été observés dans de nombreux matériaux hétérogènes par des méthodes non linéaires en résonance exploitant les phénomènes de dynamiques lente et rapide associés au comportement non linéaire hystérétique des matériaux endommagés [13].

Le travail effectué en fin de cette thèse s'inscrit dans ce cadre. Il est dédié à la caractérisation d'un composite SMC endommagé progressivement, par ondes acoustiques non linéaires en résonance et par EA. L'endommagement du matériau est quantifié dans un premier temps par le suivi de l'énergie élastique libérée sous forme d'EA par chaque mode d'endommagement, identifié par la méthode d'analyse statistique multivariable. Ensuite, le degré d'endommagement est caractérisé par l'évolution du temps de relaxation (dynamique lente). L'originalité de ce travail porte sur l'obtention d'intéressantes relations

entre la vitesse de relaxation et l'énergie élastique libérée par chaque mécanisme d'endommagement identifié dans ce matériau lors du processus d'endommagement. Ces relations permettent de connaître la contribution des différents types d'endommagement au comportement non linéaire en dynamique lente et d'identifier les mécanismes critiques menant à la rupture finale de matériaux composites SMC.

Le chapitre 1 présente les matériaux composites étudiés, les techniques expérimentales utilisées pour le suivi et la caractérisation de l'endommagement des matériaux et une étude bibliographique relative à l'identification des sources d'EA au sein d'un matériau composite. La méthode d'analyse statistique multivariable permettant de discriminer les mécanismes d'endommagement en fonction des signaux d'EA reçus est décrite au chapitre 2. Les résultats obtenus avec cette méthode sur différents types de composites soumis à diverses sollicitations mécaniques sont exposés au chapitre 3. Le chapitre 4 présente l'étude temps-échelle et notamment les transformées en ondelettes appliquées aux signaux d'EA issus des matériaux composites. Les nouveaux descripteurs définis à partir de ces transformées sont détaillés. Les résultats obtenus en les introduisant dans la méthode de classification sont présentés pour des matériaux composites de complexité croissante et ils sont comparés avec ceux obtenus par classification avec les descripteurs temporels usuels. Enfin avant de conclure notre travail, le chapitre 5 présente les méthodes de résonance non linéaire pour la caractérisation de l'endommagement et une procédure expérimentale permettant de relier l'EA au comportement en dynamique lente non linéaire (relaxation) de chaque mécanisme d'endommagement identifié dans un matériau SMC endommagé.

Chapitre 1

Emission Acoustique (EA) : état de l'art et problématique

Les matériaux composites sont largement utilisés dans l'industrie. Leur comportement mécanique est de mieux en mieux connu mais leur mode d'endommagement et les mécanismes qui mènent à la rupture restent méconnus. Ce chapitre présente les matériaux composites utilisés dans notre travail, en particulier leur composition, leur élaboration, leurs caractéristiques mécaniques ainsi que leur processus d'endommagement en relation avec leur microstructure. La méthode utilisée afin de suivre leur mode d'endommagement est la technique d'Emission Acoustique (EA). Le principe de cette méthode, la méthode d'acquisition des signaux d'EA et ses principales applications sont détaillés. Enfin, une étude bibliographique relative à l'identification des sources d'EA au sein d'un matériau composite est présentée. La méthodologie adoptée dans cette thèse est ensuite présentée à la fin ce chapitre.

1.1 Matériaux composites et essais mécaniques

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de plusieurs matériaux de propriétés mécaniques différentes et complémentaires. Il s'agit le plus souvent d'une matrice (résine, métal, etc) renforcée par des fibres et/ou des inclusions (verre, carbone, roches, etc). Cet assemblage permet d'obtenir un matériau dit composite aux propriétés et à la résistance mécanique améliorées pour une masse plus faible. Le rôle des renforts est d'augmenter les propriétés mécaniques. La matrice permet d'assembler les renforts et d'assurer la transmission des sollicitations mécaniques vers ces derniers. Ces matériaux sont très utilisés dans l'industrie pour leurs propriétés : légèreté, tenue à la corrosion, facilité de mise en oeuvre, isolation, tenue à la fatigue, dureté et souplesse.

1.1.1 Présentation des matériaux composites

La matrice sert à incorporer les renforts afin d'optimiser le transfert des contraintes mécaniques appliquées. La matrice est composée d'un matériau ductile afin de transmettre les sollicitations mécaniques vers les renforts. Pour des applications à température ambiante, des matrices organiques constituées de matières plastiques (résines ou polymères) sont utilisées. Les matrices polymères sont les plus utilisées

de part leur facilité de mise en oeuvre. Les matrices utilisées dans cette thèse sont plus particulièrement des polymères thermodurcissables : polyesters, époxydes, etc. Les matrices thermodurcissables ont une structure moléculaire complexe, sans point de fusion. Après durcissement, il n'y a pas de reformation (fusion) possible. Leur mise en oeuvre résulte d'une réaction chimique entre une résine de base et son durcisseur ou catalyseur accompagné de différents ingrédients destinés à apporter une particularité à la réaction (accélérateur, inhibiteurs, etc) ainsi qu'à la matière (charges diverses).

Différents types de renfort peuvent être utilisés dans les composites (fibres longues ou courtes, inclusions de nature diverse). Les renforts et leur disposition dans la matrice influent sur les propriétés finales du matériau composite. Les renforts de type fibre, par exemple, peuvent être de nature (rigidité) différente : verre, polymère, carbone, polyamide aromatique (kevlar), etc, et font donc appel à des procédés d'élaboration différents et parfois complexes. Les composites sont considérés comme isotropes lorsque les fibres de renfort sont aléatoirement distribuées dans le volume, par exemple sous forme de fibres courtes (composite SMC (Sheet Molding Compound)). Lorsque les fibres sont alignées dans la matrice, le degré d'anisotropie varie du composite unidirectionnel jusqu'au multidirectionnel. La résistance du composite selon une direction perpendiculaire au plan de disposition des fibres est toujours faible.

Les fibres de renfort que l'on utilise dans ce travail sont des fibres de verre. Elles sont élaborées à partir d'un verre filable (textile) composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. Ce sont les premiers matériaux de renfort utilisés dans les composites dès les années quarante et les plus utilisés actuellement pour leur bon rapport qualité/prix. Elles possèdent une résistance élevée à la rupture. Un problème associé à ces fibres est leur sensibilité aux endommagements superficiels (rayures) qui limitent leur résistance mécanique et créent des zones de concentration de contrainte. Afin de remédier à ce problème, un enduit est utilisé lors de la fabrication pour recouvrir les fibres afin d'empêcher tout contact entre les fibres et pour favoriser l'adhésion entre les fibres et la matrice.

1.1.1.1 Matériaux composites de type fibre/matrice

L'étude présentée dans cette thèse porte sur des matériaux composites de type fibre de verre/matrice époxy (ou à matrice polyester). Les fibres de verre peuvent avoir différentes orientations par rapport à l'axe de sollicitation. La figure 1.1 présente les différentes catégories de matériaux composites à fibres selon le type de renfort et leur arrangement. La disposition particulière des fibres dans la matrice permet de favoriser, selon les applications, la résistance du composite dans certaines directions plus que d'autres.

Les matériaux utilisés dans cette étude sont des composites à fibres discontinues de type SMC (Sheet Molding Compound), des composites à fibres continues unidirectionnelles et des composites stratifiés à plis croisés. Ces matériaux sont élaborés au laboratoire des APS de l'IUT GMP de l'Université du Maine.

Le composite SMC de qualité industrielle (Sheet Molding Compound) est constitué d'une résine en polyester, d'un enduit en carbonate de calcium, d'agent additif thermoplastique et de fibres de verres aléatoirement orientées. Les fibres de verre sont des fibres courtes de 25mm de longueur et présente une concentration d'environ 30%. La fraction volumique relativement faible des fibres de verre et le manque de contrôle de la distribution des différents autres constituants lors de la fabrication du matériau, conduisent à une structure hautement hétérogène ayant des zones de concentration de contraintes situées en différents endroits (extrémités des fibres, interfaces fibres/matrice, etc).

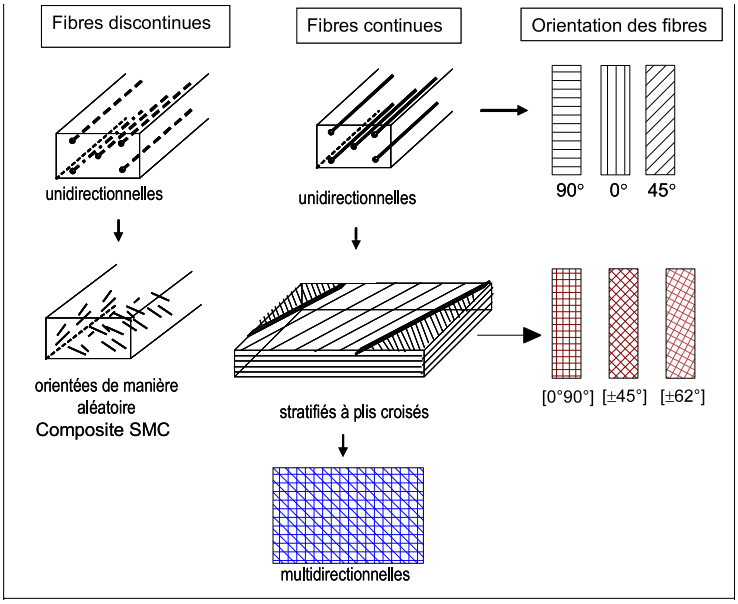


FIG. 1.1 – Catégories de matériaux composites à fibres selon le type de renfort et leur arrangement.

Les composites unidirectionnels et les plis croisés sont composés de résine époxy ou polyester mélangée à un durcisseur, d'enduit et de couches de fibres (entre 8 et 12 pour les plis croisés) avec une orientation choisie. Par exemple, les composites à plis croisés composés de 12 couches de fibres orientées à $\pm 62°$ par rapport à l'axe de sollicitation sont notés : $[\pm 62°]_{12}$ et les composites à plis croisés composés de 8 couches de fibres orientées successivement à 90° et 0° par rapport à l'axe de sollicitation sont notés : $[90°0°]_8$. Le taux volumique de fibres de ces composites est d'environ 60%. Ces composites sont élaborés à température ambiante par moulage sous pression pendant 24 heures environ. Des plaques rectangulaires de composites de surface $250 \times 250 mm^2$ et d'épaisseur comprise entre 2 et 3mm sont ainsi obtenues dans lesquelles sont découpées les éprouvettes à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté.

1.1.1.2 Matériaux composites de type béton polymère

Le béton polymère est constitué de trois éléments principaux : mélange résine époxyde-durcisseur, granulats, sable. Lors de sa fabrication (au laboratoire des APS de l'IUT GMP de l'Université du Maine), le mélange résine époxyde-durcisseur est malaxé avec du sable fin de diamètre moyen 0.4mm (voir figure 1.2a) afin de constituer le mortier. Le mortier est ensuite mélangé aux agrégats qui servent de renfort : ce sont des granulats de 2mm de diamètre moyen (voir figure 1.2b). Le taux volumique de granulats est d'environ 30%. Des micro-vides (porosité) et des micro-fissures peuvent être produits lors de l'élaboration de ce matériau. Après un temps de polymérisation de quelques jours à température ambiante, les éprouvettes parallélépipédiques sont découpées à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté, à partir d'une plaque de $250 \times 250\ mm^2$ de surface et de 15mm d'épaisseur.

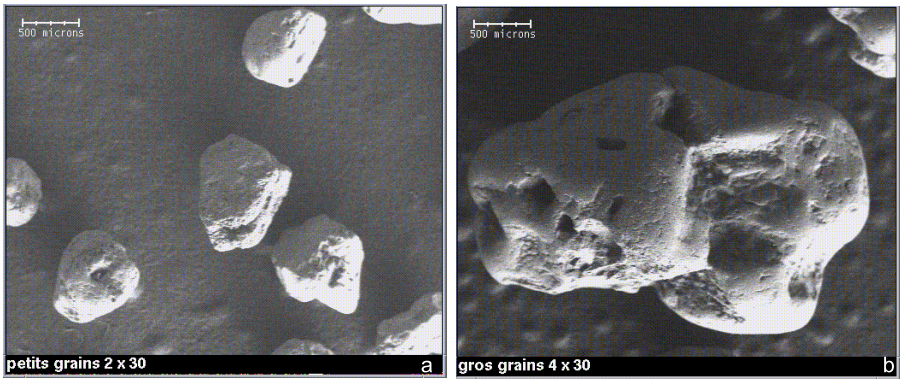


FIG. 1.2 – Micrographies des éléments constitutifs du béton polymère : (a) sable fin. (b) granulat.

1.1.2 Sollicitations mécaniques

Les matériaux composites étudiés sont soumis à différentes sollicitations mécaniques à température ambiante : des essais de flexion trois points quasi statique, des essais de traction simple et des essais de fluage en traction. La mise sous charge statique est assurée par une machine d'essais hydrauliques universelle type INSTRON modèle 8516 de 100kN de capacité, où le pilotage et l'acquisition se font par ordinateur.

Les essais de traction quasi-statique et de flexion quasi-statique trois points sont effectués avec une vitesse de déplacement de la cellule fixée à 0.5 mm/mn (0.05 mm/mn pour les bétons). Durant ces essais, la vitesse de déplacement de la cellule reste constante jusqu'à la fin de l'essai (c'est-à-dire jusqu'à la rupture de l'échantillon mise en évidence par une chute de la contrainte appliquée). L'allure générale des courbes de comportement (traction, flexion) des matériaux hétérogènes peut être divisée en trois phases (voir figure 1.3) [14] :

- Une première phase linéaire pendant laquelle la présence éventuelle de l'endommagement n'évolue pas.
- Une deuxième phase caractérisée par le développement de microfissures au sein du matériau. La fin de cette phase est caractérisée par une baisse de rigidité correspondant aux premières macrofissures.
- Une troisième phase de propagation des fissures à l'échelle macroscopique conduisant à la rupture du matériau.

Les essais de fluage déterminent la déformation à long terme sous une charge statique, qui peut être en traction. Un chargement constant est appliqué aux matériaux et la déformation est suivie simultanément. La réponse en déformation typique à un essai de fluage (voir figure 1.4) sur un matériau composite est généralement divisée en trois parties [15, 16] :

- fluage primaire : il correspond à une déformation instantanée élastique sous l'effet de la contrainte mécanique initiale suivie d'une déformation dépendant du temps,
- fluage secondaire : il correspond à un taux de déformation quasi constant avec le temps,
- fluage tertiaire : il correspond à une accélération brutale et continue de la déformation menant à la rupture finale du matériau.

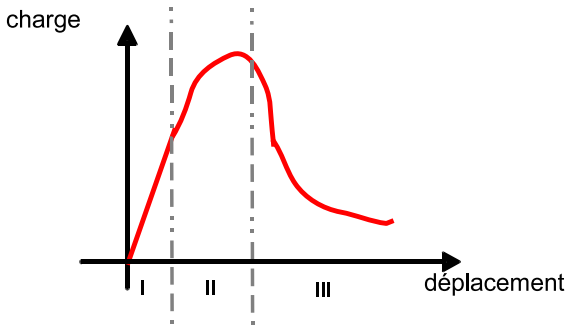


FIG. 1.3 – Courbe de comportement des matériaux hétérogènes.

Cette déformation est due au comportement viscoélastique des matériaux composites base polymère.

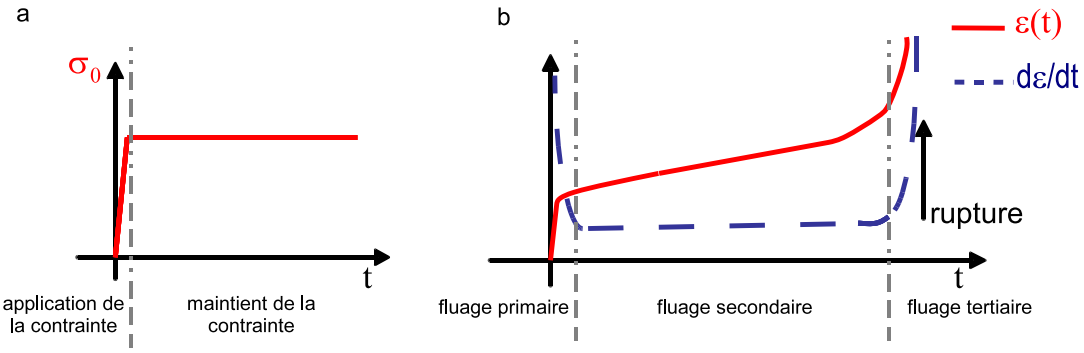


FIG. 1.4 – Essai de fluage : (a) contrainte appliquée σ_0. (b) Réponse en déformation $\epsilon(t)$ et taux de déformation $d\epsilon/dt$.

1.2 Mécanismes d'endommagement des matériaux composites

1.2.1 Matériaux composites de type fibre/matrice

Durant le processus de dégradation des matériaux composites soumis à une sollicitation mécanique, plusieurs mécanismes d'endommagement à l'échelle microscopique sont généralement mis en jeu. Pour les composites à fibres, quatre principaux modes d'endommagement peuvent intervenir (figure 1.5) [14, 17] : les fissurations de matrice, les ruptures de fibres, les décohésions interfaciales et les délaminages.

– Fissurations de matrice : des microfissurations apparaissent au niveau des défauts présents dans la matrice. Ces microfissurations vont entraîner la propagation de fissures selon la direction perpendiculaire à la sollicitation. La contrainte au niveau des fissures peut provoquer une rupture de fibre ou un décollement interfacial à l'arrivée à une interface.

– Ruptures de fibres : elles s'amorcent au niveau des défauts présents dans les fibres quand la contrainte appliquée excède la contrainte à la rupture. Les interfaces autour des fibres peuvent également se rompre et ainsi permettre un déchaussement des fibres.

– Décohésions interfaciales : les deux mécanismes cités précédemment s'accompagnent généralement de décohésions aux interfaces fibre/matrice. Ces décollements dépendent de la qualité de l'adhésion aux interfaces. En effet, dans le cas d'une interface très résistante, la rupture initiée, soit par rupture de fibres, soit par rupture de la matrice, induit des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans la matrice. Pour une interface de faible résistance, la rupture de la matrice traverse les fibres sans qu'il y ait rupture de fibres, mais avec décohésion de l'interface fibre-matrice.

– Délaminages : les délaminages représentent les décollements entre les différents plis de fibres pour les matériaux constitués d'une superposition de couches de fibres (stratifiés). Ce type d'endommagement dépend de la nature des constituants, de l'architecture des couches et du mode de sollicitation mécanique imposé. Le délaminage, qui apparaît après la phase d'endommagement intralaminaire, commence souvent sur les bords avant de s'étendre sur toute l'éprouvette.

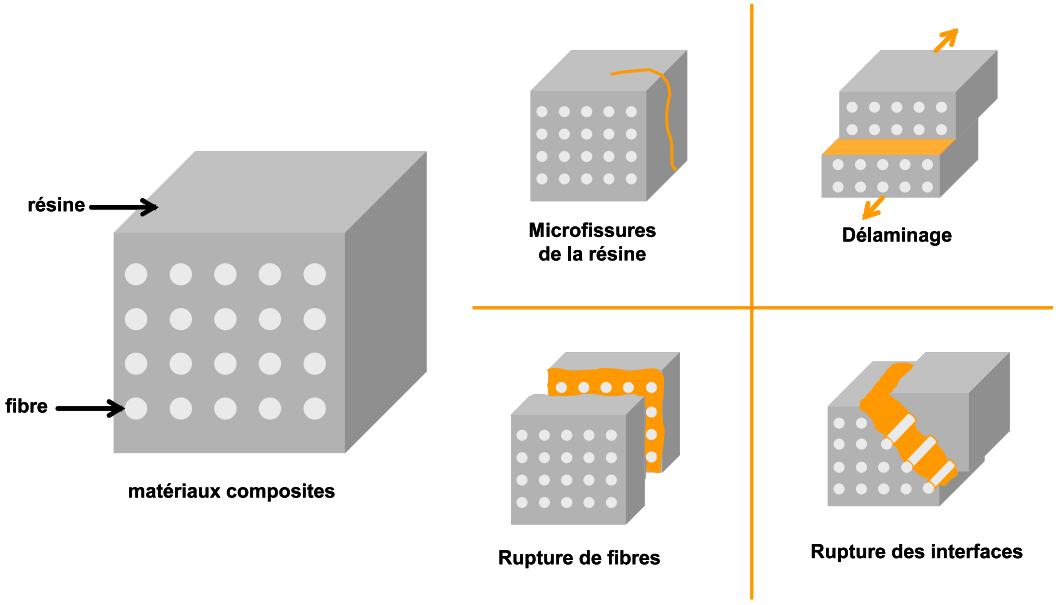


FIG. 1.5 – Matériaux composites composés de résine renforcée par des fibres de verre et principaux modes d'endommagement.

1.2.2 Influence de la direction de sollicitation sur les modes de rupture

Selon le type de composite fibre/matrice et le mode de sollicitation, notamment la direction de sollicitation par rapport à la direction des renforts, certains mécanismes d'endommagement peuvent être favorisés.

– En traction dans l'axe des fibres, trois modes de rupture interviennent : des microfissurations de matrice apparaissent et se développent ensuite perpendiculairement aux fibres et entraînent des décohésions aux interfaces. Des zones de concentration de contraintes se forment aux interfaces et provoquent la rupture de fibres qui conduisent à la rupture finale du matériau.

– En traction perpendiculaire aux fibres, la matrice et les interfaces sont les seules sollicitées. Des microfissures se développent au niveau des défauts. La qualité d'adhésion des interfaces fibre/matrice détermine le type de microfissures qui se propagera et mènera à la rupture du matériau.

– En traction à 45° par rapport à l'axe des fibres, l'endommagement interfacial est favorisé par cisaillement.

– En traction déviée par rapport à l'axe des fibres, la matrice, les fibres et les interfaces sont toujours sollicités et peuvent s'endommager. La répartition entre les différents mécanismes d'endommagement varie en fonction de l'inclinaison des fibres par rapport à la direction de sollicitation.

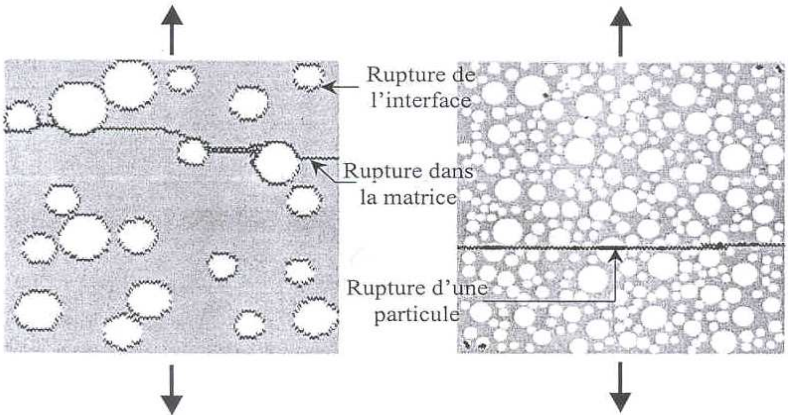


FIG. 1.6 – Différents types d'endommagement dans un matériau hétérogène de type béton polymère.

1.2.3 Matériaux composites de type béton polymère

Les premiers endommagements intervenant lors d'une sollicitation quelconque sur un matériau granulaire base polymère commencent à se développer à l'échelle microscopique lorsque l'effort localisé atteint la limite de rupture d'un des constituants (résine, granulats, sable) ou celle de l'interface les reliant. Les mécanismes d'endommagement potentiels d'un matériau hétérogène base polymère soumis à une sollicitation mécanique, peuvent se regrouper en trois principaux types : la fissuration matricielle, la rupture de l'interface agrégat/matrice (décohésion interfaciale) et la rupture des agrégats (voir figure 1.6) [18,19]. Les microfissurations apparaissant au niveau des défauts présents dans la matrice vont entraîner la propagation de fissures selon la direction perpendiculaire à la sollicitation. Les contraintes au niveau des fissures peuvent provoquer des ruptures de granulats ou des décollements interfacials.

Tous ces mécanismes d'endommagement s'accompagnent d'une libération d'énergie sous forme d'émission acoustique. Une présentation de ce phénomène est faite dans le paragraphe ci-après.

1.3 Emission Acoustique

1.3.1 Présentation de l'EA

L'Emission Acoustique (EA) [1,20] correspond à un phénomène de libération d'énergie élastique sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau ayant des processus dynamiques de déformation. Les ondes élastiques, de natures et de fréquences diverses, se propagent dans le matériau avant d'atteindre sa surface et peuvent éventuellement subir des modifications.

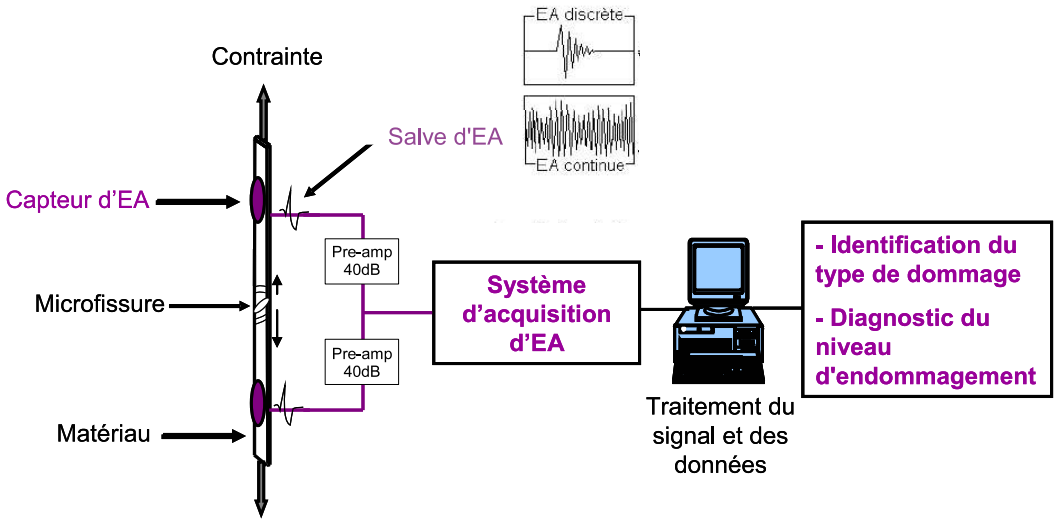


FIG. 1.7 – Dispositif de mesure d'émission acoustique.

La figure 1.7 présente la chaîne d'acquisition de l'EA. Un matériau est mis sous contrainte mécanique et des microfissures se créent au niveau des défauts dans le matériau. Des ondes élastiques transitoires sont ainsi créées. Les ondes sont recueillies à la surface par des capteurs piézoélectriques, elles sont amplifiées et fournissent le signal d'émission acoustique. Cette technique permet de déceler en temps-réel l'évolution de l'endommagement dans un matériau. C'est une technique non destructive, ne nécessitant pas de signal excitateur.

Il existe deux types d'EA :

– L'émission acoustique discrète : les signaux d'EA générés dépendent des capteurs utilisés : sinusoïdes amorties (salves) dans le cas de capteurs résonants, impulsions courtes dans le cas de capteurs large bande.

– L'émission acoustique continue : lorsque les signaux sont fréquents et se chevauchent, il n'est pas possible de les séparer en salves. Elle est principalement observée dans les matériaux métalliques (déformation plastique).

Les sources d'EA sont liées à des phénomènes irréversibles dans les matériaux. Pour les matériaux composites, les principales sources d'EA sont attribuées aux mécanismes d'endommagement présentés précédemment ou à des phénomènes de frottement. Cependant de nombreux phénomènes physiques peuvent être sources d'EA :
– déformation plastique, mouvement de dislocations, ruptures d'inclusions ou de composés métalliques
– amorçage et propagation de fissures (contrainte statique, fatigue, etc)
– fragilisation par l'hydrogène, corrosion
– ruptures micro et macroscopiques dans les matériaux composites
– frottements, impacts mécaniques
– fuites (liquide et gaz)
– bruits extérieurs (machine de traction, mors, etc)

1.3.2 Effet Kaiser et rapport Felicity

L'Effet Kaiser (EK) traduit la propriété d'irréversibilité des phénomènes à l'origine de la génération des ondes d'EA. Il est défini comme étant l'absence (ou la faible présence) d'EA lorsqu'un matériau porté à un niveau de sollicitation P_1 puis déchargé n'émet pas ou peu tant que la sollicitation, appliquée lors d'une deuxième charge, reste inférieure à la valeur maximale précédemment atteinte P_1. On appelle P_2 le niveau de sollicitation à l'apparition de l'EA lors de la deuxième mise en charge. Si le matériau est endommagé entre deux chargements consécutifs alors $P_2 < P_1$.
Le rapport Felicity (R_f) qui permet de quantifier l'EK est défini par :

$$R_f = \frac{P_2}{P_1} \tag{1.1}$$

Si le matériau a été endommagé alors $R_f < 1$. Généralement, l'effet Kaiser est plus respecté par les matériaux métalliques sans défaut évolutif que par les composites de nature viscoélastique qui obéissent à des évolutions temporelles des déformations susceptibles de se reproduire à contrainte constante.

1.3.3 Méthode d'acquisition des signaux d'EA

1.3.3.1 Transducteurs utilisés pour l'EA

Les transducteurs utilisés pour capter les ondes élastiques à la surface d'un matériau sont de nature piézoélectrique. Le couplage sur la surface du matériau est fait en utilisant de la graisse silicone. Le rôle du couplant est d'améliorer la transmission des ondes entre la surface de l'échantillon et le transducteur.

Deux familles de capteurs sont utilisées en EA :
– "large bande" : ils possèdent une bande passante régulière pour une étendue fréquentielle assez large pouvant aller jusqu'au MHz. Ils ont l'avantage de modifier peu la forme réelle du signal mais ils ont une faible sensibilité.

– "résonnants" : ils ont une bande passante moins large et un pic aux alentours d'une certaine fréquence. Ce pic de réponse entraîne une modification de l'allure des signaux et de leur contenu fréquentiel. Ces capteurs sont cependant les plus utilisés car ils présentent une meilleure sensibilité et permettent de détecter des signaux de plus faible amplitude.

Le nombre de capteurs utilisés permet de localiser les sources d'EA. Une localisation linéaire, sur un matériau sollicité en traction uniaxiale par exemple, ne nécessite l'utilisation que de deux capteurs. Une localisation en deux dimensions sur une plaque par exemple va nécessiter au minimum trois transducteurs. Plus la géométrie des structures étudiées devient complexe, plus le nombre de capteurs nécessaires augmente. La position d'une source d'EA liée à un signal reçu est calculée en fonction des différences de temps d'arrivée des signaux aux capteurs et de la vitesse de propagation des ondes dans le matériau étudié.

Les capteurs utilisés dans cette étude sont deux capteurs piézoélectriques "résonnants" de type Micro-80, de bande passante 100kHz-1MHz présentant un pic de résonance aux alentours de 300kHz et de 10mm de diamètre.

1.3.3.2 Chaîne d'acquisition de l'EA

Dans cette étude, un système d'acquisition des données d'EA de la société Euro Physical Acoustics (EPA) est utilisé avec deux voies d'acquisition. Les signaux d'EA détectés sont amplifiés à l'aide de deux pré-amplificateurs de 40dB de gain. Ils sont ensuite échantillonnés avec une fréquence d'échantillonnage généralement de 5MHz en prenant 2048 points. Les signaux sont enregistrés par le système d'acquisition pour traitement ultérieur. Un seuil d'acquisition compris entre 30dB et 42dB est utilisé. Ce seuil est fixé à une valeur légèrement supérieure au bruit de fond afin de l'éliminer.

Le système d'acquisition est calibré avant chaque essai en utilisant une procédure de casser de mine [21, 22] qui permet de générer des sources étalons d'ondes élastiques simulant l'EA. Ces sources d'EA sont créées sur la zone de l'échantillon entre les deux capteurs d'EA. Il suffit alors de vérifier la bonne localisation des sources créées et d'ajuster le temps d'arrivée des salves si besoin est par l'intermédiaire de la vitesse de propagation (la distance de propagation étant connue). On peut aussi vérifier que les caractéristiques (amplitude et énergie) des signaux reçus par les capteurs d'EA en fonction de la distance source-capteur restent identiques c'est-à-dire que l'atténuation des ondes dans le matériau n'est pas trop importante sur la distance de propagation. Ce test permet donc de localiser les sources d'EA, d'estimer la vitesse de propagation et l'atténuation des ondes acoustiques dans le matériau. L'atténuation des ondes reste négligeable pour les éprouvettes étudiées (moins de 3dB de perte pour la distance capteur-source).

1.3.3.3 Paramétrage du logiciel d'acquisition

Le logiciel d'EA nécessite de paramétrer l'acquisition des salves. Les PDT (Peak Definition Time), HDT (Hit Definition Time) et HLT (Hit Lockout Time) sont des fenêtres temporelles utilisées afin de définir respectivement, lors de l'acquisition d'un signal, le pic de plus forte amplitude, la durée totale et

le temps d'aveuglement du système (voir figure 1.8).

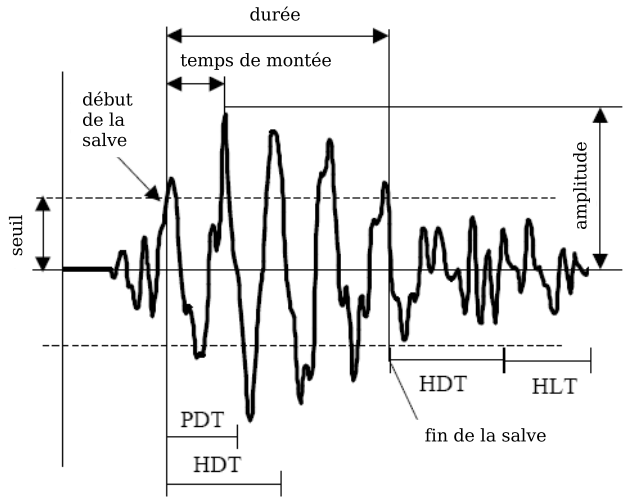


FIG. 1.8 – Paramètres d'acquisition des salves d'EA : PDT (Peak Definition Time), HDT (Hit Definition Time) et HLT (Hit Lockout Time).

Le PDT permet de déterminer le pic de plus forte amplitude et le temps de montée de la salve d'EA. Cette fenêtre débute au premier dépassement de seuil et est reconduite si un nouveau maximum est mesuré dans le PDT.
Le HDT permet de déterminer la fin de la salve donc sa durée. Cette fenêtre est reconduite à chaque dépassement de seuil. Si aucun dépassement de seuil n'est présent dans le HDT, alors la fin de la salve est définie par le dernier dépassement de seuil. Le HDT doit être aussi court que possible pour éviter d'avoir deux salves considérées comme une seule.
Le HLT permet d'exclure d'éventuelles réflexions tardives dans les signaux d'EA. Le HLT débute à la fin du dernier HDT. Ces valeurs vont définir la manière dont seront calculés les paramètres sur les signaux d'EA.
Les valeurs retenues évaluées expérimentalement sont :

- PDT : 50 μs
- HDT : 100 μs
- HLT : 400 μs

1.3.4 Paramètres temporels

Dans le cas de l'EA discrète, on fait l'hypothèse que chaque salve reçue correspond à un événement physique dans le matériau et que la forme de la salve est directement liée aux caractéristiques de cet événement. Afin de pouvoir caractériser les différents types de signaux reçus, dans le but d'identifier les différents mécanismes d'endommagement mis en jeu, des paramètres sont définis sur les salves. Les principaux paramètres exploitables sont présentés en figure 1.9. La plupart de ces paramètres sont définis par rapport au seuil d'acquisition choisi.

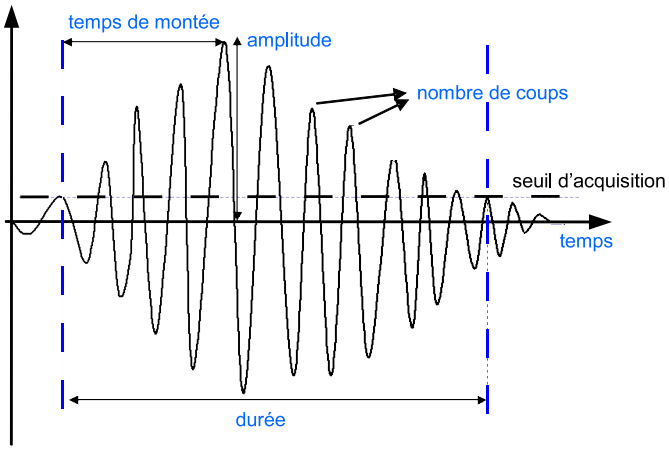


FIG. 1.9 – Salve typique d'émission acoustique et principaux paramètres temporels.

Les paramètres usuels calculés par le système d'acquisition d'EA sont :

1. l'amplitude : son unité est le décibel (dB), elle est notée A :

$$A = log\left(\frac{V(t)}{1\mu V} - (preampGain)\right) \tag{1.2}$$

   $preampGain$ est la valeur du gain des pré-amplificateurs des transducteurs d'EA (fixée à 40dB dans notre étude). $V(t)$ est le voltage détecté. La valeur d'amplitude des salves retenue par le système d'acquisition est l'amplitude crête maximale obtenue pour le voltage maximal détecté V_{max}. La distribution des amplitudes des salves couvre l'étendue 10-100dB (où 0dB correspond à 1μV en sortie des transducteurs).

2. la durée : elle correspond au temps entre le premier et le dernier dépassement de seuil, elle est notée T (unité : microseconde (μs)).

3. le nombre de coups : il correspond au nombre de franchissements de seuil sur la durée du signal.

4. l'énergie absolue : elle est définie par :

$$Eabs(T) = \int_T |A|^2 \, dt \tag{1.3}$$

   L'unité de l'énergie absolue $Eabs$ est l'attoJoule (aJ), 1aJ = 10^{-18}J.

5. l'énergie (Unité Arbitraire (U.A.)) :

$$E(T) = \int_T A \, dt \tag{1.4}$$

6. le temps de montée : c'est le temps qui sépare le premier dépassement de seuil de l'amplitude maximale du signal (unité : microseconde (μs)).

7. le nombre de coups au pic : il correspond au nombre de franchissements de seuil par le signal entre le premier dépassement de seuil et l'amplitude maximale.
8. la fréquence moyenne : c'est le nombre de coups d'une salve divisé par sa durée (unité : kHz).

1.4 Identification des sources d'EA dans les matériaux composites

Chaque signal d'EA généré contient des informations utiles sur le mécanisme d'endommagement source. Un des principaux problèmes de l'EA est de pouvoir discriminer les différents mécanismes d'endommagement à partir des signaux d'EA détectés. Dans l'analyse conventionnelle de l'émission acoustique, la propagation et les altérations du signal ne sont pas prises en compte. Cette étude consiste à analyser des paramètres extraits des salves d'EA et à les relier aux sources d'EA. Ces paramètres dépendent fortement des propriétés du matériau, des géométries des éprouvettes, des capteurs utilisés et du système d'acquisition. La modélisation de la propagation et la prise en compte des fonctions de transfert permettent de déterminer la fonction source indépendamment des propriétés du matériau et de sa géométrie. Cependant cette analyse est limitée en raison de l'analyse complexe nécessaire pour traiter un événement unique. Elle est donc difficilement réalisable pour un matériau composite.

1.4.1 Analyse temporelle

De nombreuses études ont montré que les mécanismes sources des signaux d'EA recueillis lors d'essais sur des composites chargés peuvent être identifiés en utilisant un ou plusieurs paramètres temporels calculés sur les salves d'EA (présentés en section 1.3.4), en particulier l'amplitude.

Benzeggagh et Barre [2] ont étudié l'amplitude des signaux d'EA de composites à fibres de verre et à matrice polypropylène soumis à des tests de traction statique et de fatigue. Ils ont identifié que les fissurations matricielles ont une amplitude comprise entre 40 et 55dB, les décohésions entre 60 et 65dB, les déchaussements (pull-out) de 65 à 85dB et les ruptures de fibres entre 85 et 95dB.

Chen *et al.* [23] ont étudié l'évolution de l'amplitude des signaux d'EA lors d'essais de flexion et de traction sur des composites à fibres courtes de carbone et à matrice en verre. Les résultats obtenus, comparés à des observations micrographiques à différents stades des essais, leur ont permis d'identifier deux zones d'amplitudes correspondant à des mécanismes différents : de 60 à 80dB pour les fissurations de la matrice et de 70 à 90dB pour les ruptures de fibres et les déchaussements (pull-out).

Kim *et al.* [24] ont réalisé des essais de mises en charge successives sur des composites à fibres de carbone et à matrice polymère à plis croisés [0°90°]. Les fissurations matricielles ont été reliées aux signaux de faibles amplitudes (40 à 70dB) et les ruptures de fibres à ceux de fortes amplitudes (60 à 100dB).

Kotsikos *et al.* [25] ont étudié des composites stratifiés [0°90°] à fibres de verre et à matrice polyester soumis à des tests de fatigue. Ils ont associé les fissurations matricielles aux signaux d'amplitude comprise entre 40 et 55dB, les délaminages de 55 à 70dB et les ruptures de fibres aux signaux de plus de 80dB.

Ceysson *et al.* [26] ont effectué différents types d'essais de flexion sur des stratifiés composés de fibres de carbone et à matrice époxy. Les distributions en amplitude obtenues sont centrées sur 50dB pour les fissurations matricielles et sur 62dB pour les délaminages.

Le tableau 1.1 présente les zones d'amplitude associées à différents mécanismes d'endommagement obtenues dans la littérature pour différents types de composites soumis à différents modes de sollicitation.

Auteurs	Benzeggagh [2]	Chen [23]	Kim [24]	Kotsikos [25]	Ceysson [26]
Composites	verre/polypropylène	carbone/verre	carbone/époxy	verre/polyester	carbone/époxy
Fissurations matricielles	40-55dB	60-80dB	40-70dB	40-55dB	50dB
Décohésions	60-65dB				
Délaminages				55-70dB	62dB
Ruptures de fibre	85-95dB	70-90dB	60-100dB	>80dB	

TAB. 1.1 – Synthèse des valeurs d'amplitude de différents mécanismes d'endommagement trouvées dans la littérature obtenues pour différents types de composites soumis à diverses sollicitations mécaniques.

Ces études montrent que les mécanismes d'endommagement rencontrés dans les composites peuvent être classés par amplitude croissante : fissurations matricielles, décohésions et délaminages, ruptures de fibres. Cependant ces distributions d'amplitude varient selon le type d'essai et le matériau. Pour les matériaux composites se rapprochant le plus des matériaux que nous étudions [2, 25, 26], les distributions d'amplitude obtenues pour chaque mécanisme d'endommagement sont assez similaires mais il semble difficile de pouvoir les définir distinctement. De plus, dans la plupart de ces études, les distributions d'amplitude entre les différents modes d'endommagement présentent des recouvrements et rendent incertaine l'attribution d'un signal à un mécanisme d'endommagement lorsque son amplitude est comprise dans une zone de recouvrement.

Ainsi pour ces deux raisons, d'autres études ont porté sur l'analyse simultanée de plusieurs paramètres afin d'améliorer la caractérisation des mécanismes sources d'EA.

Ativitavas *et al.* [27] ont étudié des composites stratifiés unidirectionnels à fibres de verre et à matrice plastique sollicités en traction. L'analyse de l'amplitude et de l'énergie des signaux couplée à des observations micrographiques à différents stades des essais ont montré que les microfissurations matricielles apparaissent en premier dans les essais, suivies par des ruptures de fibres qui engendrent des décohésions. En fin d'essai, des délaminages sont détectés. Ils ont associé les ruptures de fibres aux événements d'amplitude (supérieure à 74dB) et d'énergie élevées et les autres mécanismes d'endommagement aux événements d'amplitude inférieure à 74dB, sans pouvoir les dissocier à cause de recouvrements dans les distributions.

Huguet, Godin *et al.* [3] ont procédé à une analyse conventionnelle simultanée de plusieurs paramètres d'EA lors d'essais de traction sur des matériaux composites unidirectionnels fibre de verre/matrice polyester et fibre de verre/matrice époxy. Des essais ont d'abord été menés sur des matériaux composés de matrice seule de manière à identifier les signaux caractéristiques des microfissurations matricielles. D'autres essais ont été menés sur des éprouvettes unidirectionnelles avec une orientation des fibres à 90° et 45° par rapport à l'axe de sollicitation pour favoriser les décohésions fibre-matrice et identifier les signaux d'EA correspondant à ce mécanisme. Des essais ont été conduits sur des composites monofilamentaires pour identifier les signaux correspondant aux ruptures des fibres. Enfin des essais sur des

composites stratifiés à plis croisés ont été menés afin de générer des signaux correspondant aux délaminages entre les plis. L'analyse paramétrique des signaux d'EA a été effectuée en considérant l'amplitude, le temps de montée, la durée et l'énergie des signaux d'EA. Cette étude a permis d'identifier trois types de signaux appelés signaux de type A, B, C et D respectivement. Leurs principales caractéristiques sont (figure 1.10) :

- Signaux de type A (microfissurations matricielles) : Ils ont une amplitude comprise entre 50 et 70dB et sont caractérisés par des formes d'onde de faible durée, un temps de montée assez lent et une énergie relativement faible.
- Signaux de type B (décohésions) : Ils ont une amplitude comprise entre 70 et 100dB et sont caractérisés par des temps de montée assez courts et des énergies plus élevées.
- Signaux de type C (ruptures de fibres) : Ils ont des temps de montée ainsi que des temps de décroissance relativement courts avec des amplitudes et énergies assez importantes. Ces signaux sont très proches des signaux de type B.
- Signaux de type D (délaminages) : Ils ont des durées très longues, des temps de montée lents, ils sont assez énergétiques avec une gamme d'amplitude assez large.

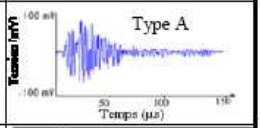
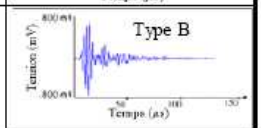
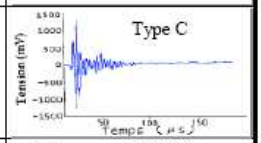
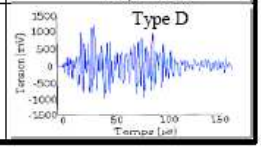
	Temps de montée	Durée du signal	Décroissance du signal	Type du signal	Forme du signal
Type A	Moyen	Moyenne	Lente	Résonnant	
Type B	Court	Moyenne	Courte	Impulsionnel	
Type C	Court	Courte	Courte	Impulsionnel	
Type D	Lent	Très longue	Lente	Résonnant	

FIG. 1.10 – Caractéristiques des signaux de type A, B, C, D identifiés par Huguet *et al.* [3].

Nechad *et al.* [15, 16] ont étudié des composites verre/polyester unidirectionnels et à plis croisés et des composites SMC soumis à des essais de fluage en traction. Ils ont réalisé une étude paramétrique en considérant l'amplitude, l'énergie absolue et la durée des signaux d'EA. Ils ont mis en évidence de manière qualitative avec l'EA la cinétique d'évolution des différents mécanismes d'endommagement dans ces matériaux soumis à un fluage.

Ces différents travaux montrent la nécessité d'analyser les signaux d'EA en prenant en compte plusieurs paramètres afin de pouvoir étudier l'évolution des modes d'endommagement lors d'essais sur des matériaux ou structures plus complexes que sur des échantillons "écoles".

1.4.2 Analyse fréquentielle et temps-fréquence

Les méthodes basées sur l'exploitation de descripteurs sont souvent limitées à l'analyse des paramètres temporels qui ne sont pas toujours pertinents pour caractériser les ondes acoustiques, notamment pour des composites de nature complexe. Ainsi, des études ont été d'abord menées dans le domaine fréquentiel afin de pouvoir relier les sources d'EA aux signaux d'EA. Ces études ont montré que chaque mécanisme d'endommagement peut être caractérisé par un pic fréquentiel différent obtenu par analyse de Fourier [28, 29].

Par exemple, Giordano *et al.* [30] ont étudié des composites unidirectionnels à matrice polyester composés d'une seule fibre de carbone sollicités en traction à 0° et 90° par rapport à l'axe des fibres. Ces tests ont permis d'identifier les signaux d'EA correspondant aux ruptures de fibres. L'analyse de Fourier appliquée à ces signaux a montré que les ruptures de fibres présentent des pics de fréquence aux alentours de 400kHz.

Ni *et al.* [31] ont étudié les caractéristiques des signaux d'EA, telles que l'atténuation et la dépendance fréquentielle lors de l'endommagement de composites composés d'une seule fibre. Ils ont montré que les fréquences des signaux d'EA sont presque inchangées alors que les amplitudes des signaux s'atténuent fortement lorsque la distance de propagation entre les sources d'EA et les capteurs augmente.

Puisque les signaux d'EA dans les matériaux composites ne sont pas stationnaires, des études temps-fréquence ont été menées.

De Groot *et al.* [32] ont utilisé les transformées de Fourier à court terme sur des signaux d'EA issus de matériaux composés de carbone et époxy soumis à des tests de traction dans diverses conditions afin de produire des modes d'endommagement particuliers dans chacun des types d'essais. Ils ont ainsi déterminé les bandes fréquentielles caractéristiques de chaque mécanisme d'endommagement étudié : les fissurations matricielles de 90 à 180kHz, les décohésions de 240 à 310kHz et les ruptures de fibres pour des fréquences moyennes de plus de 300kHz.

Le tableau 1.2 ci-dessous résume les différentes valeurs de fréquence trouvées dans la littérature traitant de l'analyse du contenu fréquentiel des signaux d'EA de composites soumis à un chargement.

Composites	Auteurs	Fissurations matricielles	Ruptures de fibre	Décohésions	Délaminages
carbone/époxy	De Groot [32]	90-180kHz	>300kHz	240-310kHz	
graphite/époxy	Russell [33]	50-150kHz	140-180kHz		
verre/polyester	Suzuki [34]	30-150kHz	300-400kHz	180-290kHz	30-100kHz
verre/PET	Suzuki [35]	80-130kHz	250-410kHz	250-410kHz	
carbone/époxy	Komai [36]	<300kHz	>500kHz	<300kHz	

TAB. 1.2 – Valeurs de fréquence trouvées dans la littérature traitant de l'analyse du contenu fréquentiel des signaux d'EA de composites soumis à un chargement.

Ainsi, l'analyse temps-fréquence ou temps-échelle des signaux d'EA apparaît comme une technique très prometteuse pour discriminer les mécanismes d'endommagement. Beaucoup de travaux ont montré que les transformées en ondelettes continues (TOC) (voir chapitre 4) constituent un outil de discrimination des signaux d'EA pour différents matériaux soumis à diverses chargements.

Hamstad *et al.* [37] ont utilisé une TOC pour identifier les sources d'EA dans des plaques d'aluminium. Ils ont montré que les représentations obtenues par TOC sont modifiées selon le type de source d'EA et avec la distance de propagation entre les sources d'EA et les capteurs.

Des études ont montré que les représentations temps-échelle obtenues par TOC permettent de caractériser les mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites : Ni *et al.* [31] les ont utilisées pour des composites composés d'une seule fibre et Ferreira *et al.* [38] les ont utilisées pour des composites polymères renforcés par des fibres de verre soumis à des tests de traction et de flexion.

Gallego *et al.* [8] ont utilisé des diagrammes énergie-échelle-position (pourcentage de la longueur totale de rayure) obtenus à partir des ondelettes afin de discriminer les caractéristiques d'adhérence de couches sur un acier galvanisé soumis à des tests de rayure des couches.

Des études ont utilisé les représentations temps-échelle obtenues par TOC sur des signaux typiques d'EA afin d'identifier les différents mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites. Suzuki *et al.* [39] ont ainsi obtenu des scalogrammes de signaux d'EA issus de composites polymères renforcés par des fibres de verre longitudinales soumis à des tests de traction. Les scalogrammes ont été classés en quatre types et corrélés aux mécanismes d'endommagement.

Les transformées en ondelettes discrètes (TOD) sont aussi utilisées pour discriminer les signaux d'EA. Les TOD permettent de décomposer chaque signal dans des bandes de fréquence continues qui dépendent du niveau de décomposition (voir chapitre 4). Ainsi, il est possible de déterminer avec les TOD les niveaux de décomposition les plus énergétiques et d'identifier les bandes de fréquence représentatives de chaque mécanisme d'endommagement.

Loutas *et al.* [40, 41] ont utilisé les TOD pour des composites à matrice polyester renforcée par des fibres de verre présentant un trou au milieu de l'éprouvette et soumis à des tests de traction quasi-statique. Ils ont montré à partir de l'énergie de chaque niveau de décomposition pour tous les signaux d'EA que le plus grand pourcentage d'énergie est compris dans l'intervalle 200-400kHz.

Des études ont montré que des descripteurs extraits des TOD permettent de discriminer les mécanismes d'endommagement dans les matériaux composites. Qi *et al.* [42] ont appliqué les TOD à des signaux d'EA obtenus lors de tests de traction statique sur des composites unidirectionnels et des plis croisés composés de fibre de carbone et de matrice plastique. Ils ont défini le taux d'énergie et le pourcentage de l'énergie totale des signaux d'EA dans chaque niveau de décomposition. Ainsi, ils ont pu identifier les bandes fréquentielles représentatives des différents mécanismes d'endommagement intervenant dans les composites étudiés.

Enfin, Piotrkowski *et al.* [43] ont défini un descripteur fréquentiel issu des TOD afin d'identifier les différentes étapes d'endommagement de l'adhérence de couches de nitride d'échantillons d'acier soumis à des tests de rayure. Ce descripteur, correspondant à la fréquence à laquelle la densité spectrale de puissance prend sa valeur maximale, leur a permis d'identifier les différentes étapes d'endommagement.

1.4.3 Analyse statistique multivariable

Les méthodes paramétriques conventionnelles se sont avérées insuffisantes pour évaluer l'importance relative des modes d'endommagement identifiés et leur cinétique d'évolution en cours d'essai. Afin d'améliorer la classification des événements d'EA, des méthodes d'analyse statistique multivariable ont été utilisées (une description plus détaillée est donnée en chapitre 2). Ces méthodes permettent de défi-

nir les ressemblances ou les différences entre les données en prenant en compte non pas un paramètre caractéristique mais d paramètres, appelés aussi descripteurs.

Appliquées à l'EA, ces méthodes de reconnaissance des formes permettent de prédire l'appartenance des données d'EA à des classes représentatives des différents mécanismes d'endommagement. Dans cette partie, nous présentons des travaux relatifs à l'utilisation de classifieurs dans le but d'identifier la signature acoustique des différents mécanismes sources se produisant lors de l'endommagement dans les matériaux composites sollicités mécaniquement.

Deux algorithmes de segmentation des données (MaxMin distance [44] et une version modifiée de la méthode des k-moyennes [45]) ont été utilisés dans le but de classifier les signaux d'EA par Anastassopoulos *et al.* [46] sur des composites verre/époxy et carbone/carbone sollicités en traction et par Kostopoulos *et al.* [4] pour des composites oxide/oxide sollicités en traction. Anastassopoulos *et al.* [46] ont appliqué la classification avec quatre paramètres (temps de montée, amplitude, temps de décroissance et durée). Ils ont identifié six classes et ont suivi leur évolution en fonction de l'avancement des essais, permettant d'établir un critère d'approche de la rupture du matériau. Kostopoulos *et al.* [4] ont établi une procédure permettant de choisir le nombre de descripteurs temporels pertinents et ils ont relié les différentes classes obtenues aux possibles mécanismes d'endommagement intervenant dans ces matériaux.

Ono *et al.* [47] ont étudié les signaux d'EA collectés lors d'essais sur des composites carbone/époxy unidirectionnels, à plis croisés et à fibres courtes dispersées, ainsi que sur des stratifiés verre/époxy à plis croisés. Ils ont d'abord effectué une classification visuelle des différents types de signaux en fonction du matériau sollicité et de l'endommagement prépondérant lui correspondant. Six types de signaux pour le stratifié carbone/époxy et trois pour le stratifié verre/époxy ont ainsi été identifiés et associés à un mode d'endommagement. La technique des k plus proches voisins [48] a ensuite été utilisée pour classer les signaux provenant d'essais supplémentaires dans une des classes établie visuellement, permettant de suivre l'évolution des modes d'endommagement.

Pappas *et al.* [49] ont étudié des composites carbone/carbone sollicités en traction. Ils ont obtenu des résultats significatifs pour la segmentation des données d'EA à l'aide de la méthode des k-moyennes [45] en analysant cinq paramètres temporels. Ils ont obtenus cinq classes et les ont associées à cinq mécanismes d'endommagement différents.

Huguet *et al.* [5, 50] ont utilisé ces approches pour classifier les données d'EA avec un réseau de neurones de Kohonen [51,52] associé à un algorithme des k-means [45]. Ils ont obtenu des résultats intéressants pour des composites fibre-matrice undirectionnels et à plis croisés sollicités en traction. Cependant, cette méthode s'est avérée moins efficace pour des matériaux plus complexes tels que les SMC, les composites à plis croisés soumis à des tests de fluage, etc.

La plupart des travaux présentés utilisent comme descripteurs les paramètres conventionnels d'EA. Des travaux ont été réalisés en analysant les formes d'onde.

Johnson *et al.* [9] ont étudié des composites verre/époxy à plis croisés [0° 90°] et à ±45° sollicités en traction. Ils ont utilisé une méthode de classification supervisée (voir chapitre 2 section 2.2) basée sur une analyse en composantes principales en prenant directement les formes d'onde de signaux typiques de mécanismes d'endommagement préalablement identifiés comme paramètres d'entrée. Ils ont pu discriminer les effets dus aux fissurations matricielles et aux délaminages.

De Oliveira *et al.* [53] ont utilisé des algorithmes non supervisés de reconnaissance des formes (voir chapitre 2 section 2.2) basés sur des réseaux artificiels de neurones afin de classifier les données d'EA

selon plusieurs classes. Ils ont ainsi identifié six types de signaux d'EA différents acquis lors de tests de traction sur des composites à plis croisés composés de matrice polyester et de fibre de verre. Ces six types semblent conduire à des représentations temps-échelle différentes.

1.5 Problématique et méthodologie

Les différents travaux présentés montrent que l'EA est un bon outil pour caractériser, à partir des signaux acoustiques, les mécanismes d'endommagement au sein d'un matériau composite sous charge. L'utilisation d'un seul paramètre (tel que l'amplitude) pour décrire les signaux d'émission acoustique est insuffisante pour la discrimination des modes d'endommagement, notamment pour des matériaux plus complexes pour lesquels les distributions des paramètres se recouvrent. Les résultats les plus encourageants sont obtenus en utilisant une analyse statistique multivariable des signaux d'EA, sur des essais très cadrés, pour des géométries d'échantillons simples et des matériaux composites connus. Ces analyses multiparamètres sont prometteuses et il semble nécessaire pour les conduire d'employer une technique dite "non-supervisée", qui éloigne toute possibilité de subjectivité dans l'interprétation des résultats (voir chapitre 2 section 2.2).

Ainsi afin d'améliorer la classification pour des matériaux composites complexes, une méthode de coalescence floue [6,54] associée à une analyse en composantes principales (ACP) [7,55] est proposée dans notre étude. La méthode de coalescence floue est un algorithme permettant une classification automatique non supervisée de formes composées à partir de multiples descripteurs extraits des salves d'EA. Cette méthode est détaillée dans le chapitre 2 suivant.

Il est tout d'abord nécessaire de valider, en terme d'identification des mécanismes sources d'EA, cette méthode de classification sur des échantillons "écoles" et dont les comportements sous sollicitation sont bien connus (composites unidirectionnels). Cette étape effectuée, cette méthode peut ensuite être appliquée à des composites plus complexes s'approchant de structures réelles (plis croisés, SMC, béton polymère). Cette étude est présentée en chapitre 3.

De plus, la plupart des méthodes actuelles sont limitées à l'analyse des paramètres temporels qui ne sont pas toujours pertinents pour caractériser les ondes acoustiques, notamment pour des composites de nature complexe. Les travaux réalisés sur les formes d'onde ont montré que ces techniques permettent d'obtenir des informations supplémentaires sur les signaux d'EA afin de les discriminer. Ainsi, une autre originalité de notre travail consiste à utiliser les transformées en ondelettes continues et discrètes afin d'améliorer l'identification des différents mécanismes d'endommagement pouvant intervenir dans les matériaux composites sous charge (voir chapitre 4). Plus particulièrement, l'objectif est de pouvoir définir de nouveaux descripteurs temps-fréquence ou temps-échelle afin d'améliorer la reconnaissance des modes d'endommagement des matériaux composites complexes comme celui d'un composite de fabrication industrielle.

Dans la perspective de quantifier l'endommagement des matériaux composites et d'identifier les différents mécanismes sources, les méthodes acoustiques non linéaires ont montré leur aptitude à détecter

et à caractériser les endommagements faibles ou précoces, localisés ou diffus. Plus particulièrement, des phénomènes non linéaires associés à la présence d'endommagement ont été observés dans de nombreux matériaux hétérogènes par des méthodes non linéaires en résonance exploitant les phénomènes de dynamiques lente et rapide associés au comportement non linéaire hystérétique des matériaux endommagés. Le chapitre 5 s'inscrit dans ce cadre et il est plus particulièrement dédié à la caractérisation d'un composite SMC endommagé progressivement, par ondes acoustiques non linéaires en résonance et par EA. L'énergie élastique libérée sous forme d'émission acoustique par chaque mode d'endommagement, identifié par la méthode d'analyse statistique multivariable, est suivie en fonction du niveau d'endommagement dans le matériau. Les éprouvettes endommagées sont soumises en parallèle à une forte excitation (conditionnement). Un décalage de la fréquence de résonance vers les basses fréquences proportionnel au niveau d'endommagement est observé. Ce décalage ne disparaît pas immédiatement après l'arrêt de la forte excitation, mais se résorbe en fonction du logarithme du temps (relaxation), fortement lié au degré d'endommagement. L'originalité de ce travail porte sur l'obtention d'intéressantes relations entre la vitesse de relaxation et l'énergie élastique de chaque mécanisme d'endommagement identifié dans ce matériau lors du processus d'endommagement. Ces relations permettent de connaître la contribution des différents types d'endommagement au comportement non-linéaire en dynamique lente.

Chapitre 2

Analyse statistique multivariable

L'analyse statistique multivariable permet de définir des ressemblances ou des différences entre des données en analysant plusieurs paramètres à la fois. Le problème de la reconnaissance des formes, dont le développement a débuté il y a une trentaine d'années, consiste d'une manière générale à définir les paramètres (ou descripteurs) représentatifs de l'état du système étudié, à choisir les différents états (ou classes) que le système peut avoir et à choisir une méthode de classification qui va attribuer un état à une configuration des paramètres. Ainsi, ces méthodes permettent de définir l'appartenance d'une donnée à une classe en analysant plusieurs paramètres obtenus à partir des données.

Appliquées à l'émission acoustique, ces techniques permettent d'identifier parmi un grand nombre de signaux, caractérisés par un certain nombre de paramètres qui peuvent être temporels, fréquentiels ou temps-fréquence, des classes de signaux ayant des paramètres proches et donc provenant des mêmes mécanismes d'endommagement se développant au sein d'un matériau.

Ce chapitre va d'abord définir le problème de classification et présenter les différents types de classification que l'on peut rencontrer. La méthode de classification retenue dans cette thèse est ensuite détaillée. Il s'agit de la méthode de coalescence floue (Fuzzy C-means FCM) que l'on associe à une analyse en composantes principales (ACP). Les différentes étapes nécessaires à sa mise en oeuvre sont présentées.

2.1 Définition du problème de classification

Les méthodes d'analyse statistique multivariable permettent de classifier des données, c'est-à-dire de trouver des rapprochements entre des groupes de données (ou classes) dans un espace à plusieurs dimensions. L'approche est basée sur la reconnaissance des formes [54].

Les termes utilisés en classification sont :

– Une forme (ou vecteur de forme) est un vecteur comportant les données utilisées par l'algorithme de classification. Chaque forme est ainsi caractérisée par un ensemble de paramètres dans un espace à plusieurs dimensions.

– Un descripteur ou paramètre correspond à une composante du vecteur de forme.

– Un espace à plusieurs dimensions ($\mathbb{R}^d$ pour d descripteurs) est un espace formé par les multiples descripteurs.

– Une classe est un ensemble de formes ayant des similitudes.

– Une mesure de distance permet d'évaluer la similitude entre les formes.

– Un algorithme de classification classique (ou dure) attribue chaque forme à une et une seule classe.

– Un algorithme de classification floue associe à chaque forme des degrés d'appartenance à chacune des classes en présence.

Le problème de classification peut être défini ainsi :
en considérant des données notées $\mathbf{X}$ composées de n formes x_j *(j=1,n)* exprimées dans $\mathbb{R}^d$, alors la classification de $\mathbf{X}$ est la partition de l'espace multidimensionnel en M classes ω_i *(i=1,M)* qui satisfont les conditions :

– Chaque forme doit être assignée à une classe :

$$\cup_{i=1}^{M} \omega_i = \mathbf{X}. \tag{2.1}$$

– Chaque classe contient au moins une forme :

$$\omega_i \neq \emptyset, \quad i = 1, ..., M. \tag{2.2}$$

Les algorithmes de classification divisent donc les formes en un nombre M de classes c'est-à-dire qu'ils construisent des frontières réalisant une partition d'un espace à plusieurs dimensions. Comme les classes peuvent avoir des recouvrements, le taux d'erreur peut rarement être nul. Ces algorithmes sont généralement itératifs et convergent vers un minimum local d'où la nécessité de définir des critères d'arrêt (voir section 2.9).

2.2 Classification supervisée et non supervisée

Le rôle d'une classification est de déterminer, parmi un ensemble de M classes, la classe d'appartenance d'une forme. La classification crée donc des frontières entre les différentes classes.

Dans le cas de classification non supervisée (ou classification automatique), la nature des classes n'est pas connue *a priori*. Cette méthode a l'avantage de ne nécessiter aucune information sur les données. L'utilisation de telles méthodes fait appel à des algorithmes de réduction des données et à une analyse de la répartition graphique des classes. On peut citer l'analyse en composantes principales [7, 55, 56] ou les cartes de Kohonen [52].

Dans le cas de classification supervisée, les classes sont connues par l'utilisateur. Les observations disponibles ont alors déjà une étiquette de classe, et l'objectif est d'affecter une nouvelle observation à

une classe. Cependant les observations disponibles ne sont pas initialement identifiées comme appartenant à telle ou telle population : cette information se déduit de la répartition spatiale d'observations antécédentes. La règle de discrimination est donc estimée à partir d'un ensemble d'échantillons étiquetés par un processus d'apprentissage.

Ces deux méthodes sont résumées sur le tableau 2.1.

Classification supervisée	**Classification non supervisée**
Choix des descripteurs	
Identification des différentes classes	
Apprentissage : mise en place d'une règle de discrimination	
Test	
Acquisition des données	
Constitution des formes	
Classement des formes	Classification, Partition en M classes
	Identification des classes

TAB. 2.1 – Différentes étapes de classification supervisée et non supervisée.

2.3 Partition classique et partition floue

Dans le cas d'une partition classique (partitionnement dur) de l'espace des données, l'espace des observations est segmenté en un certain nombre de régions disjointes, définies par des frontières, et toutes les formes situées dans une même région de l'espace appartiennent à une même classe. Chaque forme est ainsi assignée à une et une seule classe telle que :

$$\omega_i \cap \omega_k = \emptyset \quad avec \quad i \neq k. \tag{2.3}$$

Dans le cas d'une partition floue, chaque forme est assignée à chacune des classes avec des valeurs d'appartenance. Les classes peuvent ainsi se chevaucher. Les valeurs d'appartenance des formes, notées $u_i(x_j)$, quantifient les degrés d'appartenance des formes x_j *(j=1,n)* aux classes ω_i *(i=1,M)*. Ces valeurs d'appartenance doivent satisfaire les conditions :

–

$$u_i(x_j) \geq 0, \quad i = 1, ..., M \quad et \quad j = 1, ..., n, \tag{2.4}$$

–

$$\sum_{i=1}^{M} u_i(x_j) = 1, \quad j = 1, ..., n. \tag{2.5}$$

Les algorithmes de partition classique utilisent donc une fonction d'appartenance telle que :

$$u_i(x_j) \in \{0, 1\}, \quad i = 1, ..., M \quad et \quad j = 1, ..., n, \tag{2.6}$$

c'est-à-dire que la fonction d'appartenance $u_i(x_j)$ peut prendre uniquement deux valeurs, soit 0 si la forme x_j n'appartient pas à la classe ω_i, soit 1 si la forme x_j appartient à la classe ω_i. Les algorithmes de

partition floue utilisent une fonction d'appartenance floue dont les valeurs sont comprises dans l'intervalle [0,1] :

$$u_i(x_j) \in [0,1], \quad i = 1, ..., M \quad et \quad j = 1, ..., n. \tag{2.7}$$

2.4 Choix des descripteurs

On dispose, dans le cadre de l'émission acoustique, d'une base de données composée à partir d'un ensemble d'échantillons recueillis par le système d'acquisition. Ces échantillons, appelés paramètres ou descripteurs, contiennent des informations sur les signaux d'EA telles que : l'amplitude du signal, l'énergie, la durée, le temps de montée, etc. Ces descripteurs peuvent aussi être (re)calculés *a posteriori* à partir des salves d'EA enregistrées par le système d'acquisition et il est aussi possible d'en définir de nouveaux. Ces descripteurs peuvent être temporels, fréquentiels, temps-fréquence, etc.

Ces d descripteurs ou paramètres, obtenus à partir de n signaux d'EA, forment les composantes des n vecteurs de forme x_j *(j=1,n)* et définissent la dimension de l'espace de représentation des formes.

Le choix des descripteurs les plus pertinents à prendre en compte pour la classification peut être fait par visualisation en analyse en composantes principales (voir section 2.12).

2.5 Mesure de similitudes entre les formes

La mesure de similitudes entre les différentes formes x_j, x_i se fait, le plus généralement, en utilisant la mesure de distances :

$$d^2(x_j, x_i)_A = \|x_j - x_i\|_A = (x_j - x_i)^t \mathbf{A} (x_j - x_i), \tag{2.8}$$

qui est une norme de distance quadratique au sens de la métrique induite par $\mathbf{A}$.

Cette matrice $\mathbf{A}$ peut être la matrice de covariance qui caractérise la dispersion, comme pour le cas de la distance de Mahalanobis [57] :

$$d^2(x_j, x_i)_M = (x_j - x_i)^t \mathbf{Cx}^{-1} (x_j - x_i), \tag{2.9}$$

avec $\mathbf{Cx}$ la matrice de covariance.

La mesure de distance la plus largement utilisée est la distance Euclidienne, qui consiste à sélectionner $\mathbf{A}$ comme la matrice d'identité, et est définie par :

$$d^2(x_j, x_i) = \|x_j - x_i\| = (x_j - x_i)^t (x_j - x_i), \tag{2.10}$$

t représente le conjugué de la matrice.

Notons qu'avec ce choix de la matrice A, l'expression 2.10 mesure la distance sans pondération. La forme géométrique des classes est induite par le choix de la norme de distance.

2.6 Méthode de coalescence floue (Fuzzy C-means FCM)

La méthode de coalescence floue (FCM) [6] permet d'obtenir une classification non supervisée dans le cas de données multidimensionnelles. Cette méthode aussi appelée C-means floue est utilisée pour faire une classification en M classes, représentatives des M mécanismes d'endommagement dans le cadre de l'émission acoustique. Cette méthode utilise une partition floue de l'espace des données de telle sorte que chaque vecteur de forme x_j *(j=1,n)* peut appartenir à chacune des classes ω_i *(i=1,M)* avec différentes valeurs d'appartenance $u_i(x_j)$ comprises entre 0 et 1 (équation 2.7).

La méthode de coalescence floue (Fig. 2.1) est un algorithme itératif. Pour quantifier la "qualité" de

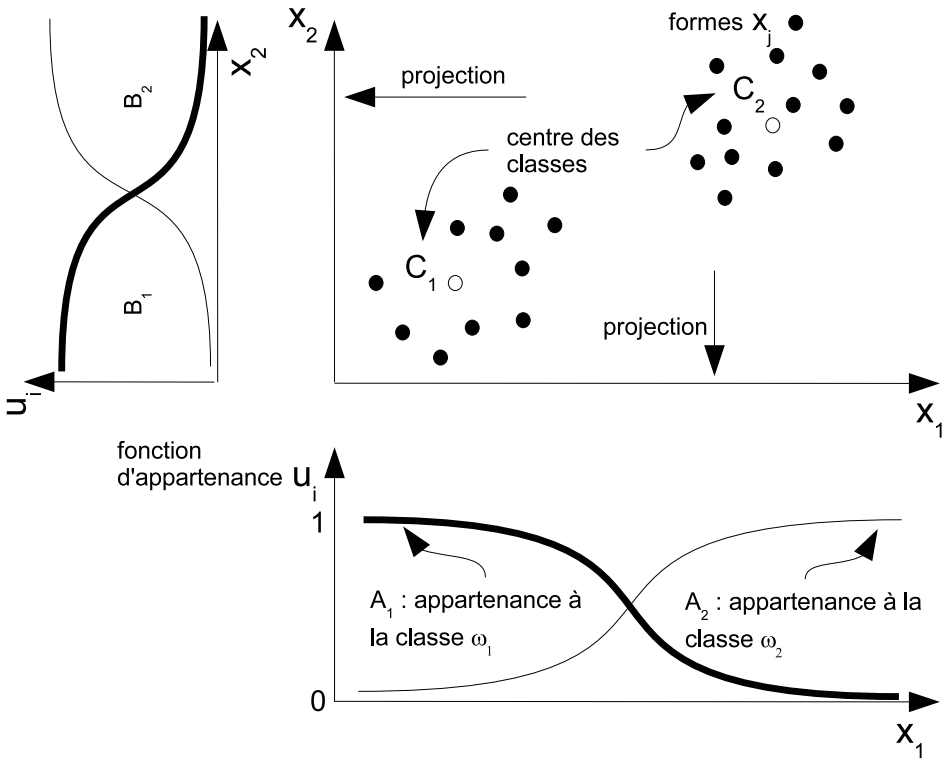


FIG. 2.1 – Identification par coalescence floue : illustration à deux classes dont les centres sont C_1 et C_2. Les formes x_j sont associées aux deux classes ω_1 et ω_2 avec une règle d'appartenance u_i. Chaque forme x_j appartient à chacune des classes avec des valeurs d'appartenance $u_i(x_j)$ comprises entre 0 et 1.

la partition P obtenue, cet algorithme a recours à une fonction critère J. Le problème de partitionnement consiste alors à trouver la partition optimale P_{opt} telle que :

$$J(P_{opt}) = \min \quad J(P). \tag{2.11}$$

La fonction critère J pour l'algorithme de coalescence floue, dont l'objectif est de trouver les centres de classes qui la minimisent, est définie comme :

$$J(\mathbf{U}, \mathbf{V}) = \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{M} [u_i(x_j)]^f \, d^2(x_j, C_i), \tag{2.12}$$

où $\mathbf{V}$ est la matrice des centres de classe C_i :

$$\mathbf{V} = [C_1 \,|C_2| \ldots C_M]\,, \tag{2.13}$$

et $\mathbf{U}$ est la matrice des appartenances avec M lignes et n colonnes telle que :

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_1(x_1) & u_1(x_2) & \ldots & u_1(x_n) \\ u_2(x_1) & u_2(x_2) & \ldots & u_2(x_n) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_M(x_1) & u_M(x_2) & \ldots & u_M(x_n) \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

dans laquelle $u_i(x_j)$ représente la valeur d'appartenance du $j^{\text{ème}}$ vecteur forme x_j à la classe ω_i sous les conditions (2.4) et (2.5).
f est un scalaire qui représente le degré de floue (généralement f=2 [6]).
$d^2(x_j, C_i)$ est la distance Euclidienne au carré entre le vecteur de forme x_j et le centre de classe C_i définie par :

$$d^2(x_j, C_i) = (x_j - C_i)^t (x_j - C_i), \tag{2.15}$$

t est le conjugué de la matrice.

2.7 Evaluation du nombre de classes à prendre en compte

L'utilisation des mesures de validation des classes est une approche qui permet de déterminer le nombre approprié de classes dans un ensemble de données. Cette approche est utile pour les méthodes de classification, commme la méthode de coalescence floue, qui nécessitent la sélection *a priori* du nombre de classes. L'analyse de validité des classes est réalisée en exécutant l'algorithme de classification pour différentes valeurs de M et à plusieurs reprises avec une initialisation différente. La mesure de validité est calculée pour chaque exécution et le nombre de classes qui optimise la mesure est alors choisi comme étant le nombre optimal de classes pour l'ensemble des données. Il faut noter que l'utilisation des mesures de validité est lourde en temps de calcul car le processus de classification doit être répété plusieurs fois.

La plupart des mesures de validité sont conçues pour quantifier deux critères [58] :
- La compacité des classes : les formes à l'intérieur d'une classe doivent être similaires entre elles et différentes des formes dans les autres classes. La variance des formes dans une classe donne cette indication de compacité.

- La séparation des classes : les classes doivent être bien séparées les unes des autres. Les mesures de distance entre les centres de classe donnent une indication sur la séparation entre les classes.

Des indices permettant d'évaluer une partition floue et reposant sur les deux critères généraux précédents ont été définis. Une synthèse sur les principaux indices peut être trouvée dans [58] :

1. Le Coefficient de Partition (CP) [6] : ce critère mesure la quantité de recouvrement entre les différentes classes. Le principal inconvénient de ce critère est le manque de rapport direct avec certaines

propriétés des données. Le nombre optimal de classes est donné par la valeur maximale de ce critère. Le CP est défini par :

$$CP(M) = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{n}(u_i(x_j))^2. \tag{2.16}$$

Un des désavantages du CP est qu'il décroît plus le nombre de classes prises en compte est grand.

2. L'Entropie de Classification (EC) [6] : ce critère est similaire au coefficient de partition précédent dans le sens que cette mesure est associée au degré de flou de la partition. Le critère est donné par l'expression suivante :

$$EC(M) = -\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{n}u_i(x_j)log(u_i(x_j)). \tag{2.17}$$

3. L'Index de Partition (IP) [59] : ce critère mesure la compacité des classes et les distances entre les centres de classes. La compacité des classes est définie par le numérateur de IP, les distances inter-classes par le dénominateur. La plus faible valeur de IP indique une meilleure partition. En effet, des classes compactes et bien séparées entre elles dans l'espace de représentation des données facilitent la classification. L'Index de Partition (IP) est défini comme :

$$IP(M) = \sum_{i=1}^{M}\frac{\sum_{j=1}^{n}(u_i(x_j))^f d^2(x_j, C_i)}{n\sum_{k=1}^{M} d^2(C_k, C_i)}. \tag{2.18}$$

4. L'Index de Séparation (IS) [59] : à l'inverse du critère précédent, cet index utilise une séparation de distance minimale pour la validation de la partition. Le critère IS est donné par :

$$IS(M) = \sum_{i=1}^{M}\frac{\sum_{j=1}^{n}(u_i(x_j))^f d^2(x_j, C_i)}{n \quad \min_{k,i} d^2(C_k, C_i)}. \tag{2.19}$$

5. L'index de validité de Dunn (D) [60] : l'objectif de ce critère est de maximiser les distances inter-classes (séparation) et de minimiser les distances intra-classes (compacité). La valeur qui rend maximal cet indice est le nombre optimal de classes à choisir. L'index de Dunn est défini comme :

$$D(M) = \frac{\min_{i,k} d(u,w)}{\max_l d(v,z)}, \quad avec \quad i,k,l = 1,M, \quad u \in C_k, \quad w \in C_i, \quad v \in C_l, \quad z \in C_l. \tag{2.20}$$

Ces critères donnent une indication pour le choix convenable du nombre de classes. Chaque critère est supposé atteindre sa valeur optimale lorsque la valeur de M correspond au nombre de classes réelles. Cependant, la recherche d'une partition optimale n'est pas évidente car il existe généralement plusieurs partitions envisageables pour un même jeu de données. L'obtention du nombre réel de classes nécessite souvent des connaissances *a priori* sur les données.

2.8 Algorithme de coalescence floue

Le paramètre d'entrée de l'algorithme de coalescence floue [6, 54] est le nombre de classes (M), déterminé à partir des critères d'évaluation d'une partition floue. L'algorithme de coalescence floue (Tab. 2.2) suit les étapes suivantes :

1. La matrice d'appartenance **U** est initialisée aléatoirement avec des valeurs comprises dans l'intervalle [0,1] qui représentent les valeurs d'appartenance $u_i(x_j)$ des n formes x_j *(j=1,n)* à chacune des classes ω_i *(i=1,M)*, conformément aux équations (2.4) et (2.5).

2. Les nouveaux centres de classes C_i sont calculés par :

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} [u_i(x_j)]^f \, x_j}{\sum_{j=1}^{n} [u_i(x_j)]^f}. \tag{2.21}$$

3. La matrice des appartenances **U** est ensuite mise à jour :

$$u_i(x_j) = \left[\sum_{k=1}^{M} \left[\frac{d(x_j, C_i)}{d(x_j, C_k)} \right]^{\frac{2}{f-1}} \right]^{-1}, \quad \text{avec} \quad i = 1, M \quad \text{et} \quad j = 1, n. \tag{2.22}$$

En recalculant, à chaque itération, les centres de classes et les valeurs d'appartenance de chaque forme, l'algorithme de coalescence floue alloue aux formes des centres de classes de plus en plus "précis". Cette méthode converge en général vers un minimum local de la fonction J (équation (2.12)). L'algorithme FCM réalise ainsi une partition floue d'un ensemble d'observations en un nombre connu *a priori* de classes.

2.9 Critères d'arrêt

Différents critères d'arrêt peuvent être utilisés dans un algorithme de classification itératif, notamment :

- arrêt lorsque la différence de valeurs d'une itération à une autre est plus petite qu'une valeur spécifiée,

- arrêt lorsque l'erreur de quantification est suffisamment petite,

- arrêt lorsque le nombre maximal d'itérations choisi est atteint.

Dans l'algorithme de coalescence floue, le critère d'arrêt choisi est le premier, c'est-à-dire que les itérations s'arrêtent lorsque la différence entre deux itérations successives est inférieure à un seuil ϵ spécifié, c'est-à-dire quelle que soit q l'étape d'itération :

$$\left\| \mathbf{U}^q - \mathbf{U}^{q-1} \right\| < \epsilon, \quad 0 < \epsilon < 1. \tag{2.23}$$

Ainsi, les étapes 2 et 3 de l'algorithme de coalescence floue sont réitérées tant que le critère d'arrêt n'est pas atteint.

Données	n formes non étiquetées x_j *(j=1,n)*
Paramétrage	nombre de classes M nombre maximal d'itérations q exposant de flou f=2 métrique pour le calcul des distances (2.8) critère d'arrêt (2.23)
Initialisation	remplissage aléatoire de la matrice de partition floue $\mathbf{U}$
Itérations	calcul des centres de classes C_i par (2.21) calcul de la partition $\mathbf{U}$ par (2.22) sous la condition (2.23)

TAB. 2.2 – Algorithme de coalescence floue.

2.10 Décision sur l'appartenance à une classe

Après avoir calculé la matrice $\mathbf{U}$ des degrés d'appartenance aux différentes classes :

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_1(\mathbf{X})^t \\ u_2(\mathbf{X})^t \\ \vdots \\ u_M(\mathbf{X})^t \end{bmatrix}, \tag{2.24}$$

avec la matrice des données $\mathbf{X}$:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1^t \\ x_2^t \\ \vdots \\ x_n^t \end{bmatrix}, \tag{2.25}$$

il reste à définir un critère de décision qui va attribuer l'appartenance à une classe en se basant sur les différents degrés d'appartenance obtenus [54]. Ainsi l'affectation α_j de la forme x_j à la classe ω_i *(i=1,M)* est faite selon *le principe du maximum d'appartenance* qui consiste à choisir la classe à laquelle la forme x_j *(j=1,n)* a le plus haut degré d'appartenance :

$$\alpha_j = i \Leftrightarrow u_i(x_j) > u_k(x_j) \quad i,k = 1,...,M \quad \forall i \neq k, \quad j = 1,...,n. \tag{2.26}$$

On peut aussi définir les options de rejet en distance et en ambiguïté. Le principe repose sur *la règle avec seuillage des appartenances*, qui consiste à associer à chaque classe ω_i *(i=1,M)* un seuil d'appartenance s_i. Soit l'ensemble $\mathrm{J}(x_j)$ des indices i des classes ω_i auxquelles x_j a un degré d'appartenance supérieur à s_i défini comme :

$$J(x_j) = \{i \quad | \quad u_i(x_j) > s_i, \quad i = 1,...,M\}. \tag{2.27}$$

Une règle simple consiste à rejeter x_j en ambiguïté si x_j a un degré d'appartenance significatif à plusieurs classes, et à choisir l'option de rejet en distance si $\mathrm{J}(x_j)$ est vide :

$$\begin{cases} \alpha_j = -1 \quad si \quad J(x_j) = \emptyset \quad \text{(distance)} \\ \alpha_j = 0 \quad si \quad Card(J(x_j)) > 1 \quad \text{(ambiguïté)} \\ \alpha_j = i \quad si \quad J(x_j) = \{i\} \quad i \in \{1,...,M\} \end{cases} \tag{2.28}$$

L'inconvénient de cette règle est que le paramètre s_i contrôle seul les deux options de rejet.

Ainsi, *la règle du rapport d'appartenance* [61] s'appuie sur le rapport :

$$0 \leq R = \frac{u_m(x_j)}{u_p(x_j)} \leq 1, \tag{2.29}$$

avec :

$$\begin{aligned} u_p(x_j) = &\quad \max_{i \in J(x_j)} u_i(x_j), \\ u_m(x_j) = &\quad \max_{i \in J(x_j), i \neq p} u_i(x_j), \end{aligned} \tag{2.30}$$

qui correspondent aux deux valeurs d'appartenance les plus grandes aux classes ω_p et ω_m.

La règle de décision devient :

$$\begin{cases} \alpha_j = -1 & si \quad J(x_j) = \emptyset \\ \alpha_j = 0 & si \quad Card(J(x_j)) > 1 \quad et \quad R \geq T \\ \alpha_j = p & sinon \end{cases} \tag{2.31}$$

T est un paramètre fixé permettant le contrôle du rejet en ambiguïté.

Une troisième règle de décision avec rejet, *la règle des degrés de confiance* [61, 62], s'appuie sur la définition de degrés de confiance fonctions des M degrés d'appartenance. Ce degré de confiance associé à la classe ω_i pour le vecteur x_j est défini comme :

$$\begin{aligned} c_i(x_j) &= u_i(x_j) \prod_{l \neq i} [1 - u_l(x_j)], \\ c_0(x_j) &= \prod_{l=1}^{M} [1 - u_l(x_j)], \end{aligned} \tag{2.32}$$

$c_i(x_j)$ étant d'autant plus grand que le degré d'appartenance à la classe ω_i est grand et que les degrés d'appartenance aux autres classes sont petits. $c_0(x_j)$ caractérise le caractère "atypique" de x_j, cette valeur étant d'autant plus grande que les degrés d'appartenance aux classes sont faibles.

La règle de décision basée sur les degrés de confiance est :

$$\begin{cases} \alpha_j = -1 & si \quad q = 0 \quad et \quad c_0(x_j) > P \\ \alpha_j = i & si \quad q = i \quad et \quad c_i(x_j) > P \\ \alpha_j = 0 & sinon \end{cases} \tag{2.33}$$

avec l'indice q tel que :

$$c_q(x_j) = \max_{k=0,M} c_k(x_j). \tag{2.34}$$

et P est un coefficient qui contrôle le rejet d'ambiguïté et le rejet de distance.
Le comportement de la règle des degrés de confiance est identique à la règle du rapport d'appartenance. La règle des degrés de confiance ne nécessite cependant le réglage que d'un seul seuil.

L'utilisation d'une règle de décision avec rejet dépend des données étudiées. En effet, ces règles sont surtout utiles dans le cas où les données se recoupent (rejet en ambiguïté) ou présente des valeurs "atypiques" (rejet en distance).

2.11 Etiquetage des classes

Pour l'émission acoustique, chacune des classes obtenues par la méthode de coalescence floue correspond à un mécanisme d'endommagement différent dans le matériau mais à ce niveau les mécanismes d'endommagement sont supposés inconnus. Pour associer chaque classe obtenue en sortie de l'algorithme de classification au mécanisme d'endommagement correspondant, les caractéristiques des vecteurs de forme de chaque classe sont considérées.

Par exemple, l'amplitude des signaux d'EA étant un des paramètres temporels les plus discriminants, la distribution d'amplitude de chaque classe obtenue est comparée aux résultats trouvés dans la littérature concernant les caractéristiques des types d'endommagement dans les matériaux composites [3,5,15,34,50]. Les autres caractéristiques principales des vecteurs de forme sont également analysées. Ainsi, chaque classe peut être associée à un mécanisme d'endommagement. Pour plus de détails, se référer au chapitre 3 suivant.

2.12 Analyse en composantes principales

L'objectif d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) est de réduire le nombre de dimensions des données [7, 55, 56]. C'est une méthode mathématique d'analyse des données qui consiste à rechercher les directions de l'espace qui représentent le mieux les corrélations entre plusieurs variables. En effet, une projection dans un espace de petite dimension, par exemple deux, facilite la visualisation des données. On considère la matrice des données $\mathbf{X}$ composée des n formes x_j :

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1^t \\ x_2^t \\ \vdots \\ x_n^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_1^2 & \dots & x_1^d \\ x_2^1 & x_2^2 & \dots & x_2^d \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n^1 & x_n^2 & \dots & x_n^d \end{bmatrix}. \tag{2.35}$$

Les données sont tout d'abord centrées et réduites (la moyenne est nulle et la variance est égale à l'unité pour chaque colonne) puis la matrice de covariance est calculée :

$$C_X = E\left[\mathbf{X}\mathbf{X}^t\right], \tag{2.36}$$

où t représente la transposée de la matrice et $E[\ ]$ l'espérance mathématique.

Les composantes de C_X, notées C_{kl} (k=1,d et l=1,d), représentent les covariances entre les variables x^k et x^l :

$$x^k = \begin{bmatrix} x_1^k \\ x_2^k \\ \vdots \\ x_n^k \end{bmatrix}, \ x^l = \begin{bmatrix} x_1^l \\ x_2^l \\ \vdots \\ x_n^l \end{bmatrix}. \tag{2.37}$$

Comme la matrice de covariance est symétrique, une base orthogonale peut être calculée en cherchant ses valeurs propres et ses vecteurs propres. Les vecteurs propres e_k et les valeurs propres correspondantes λ_k sont les solutions de l'équation :

$$C_X e_k = \lambda_k e_k, \quad k = 1, 2, ...d. \tag{2.38}$$

Les valeurs propres obtenues à partir de la matrice de covariance correspondent aux variances de chaque composante. Il est ainsi possible de calculer les variances en pourcentages *prcvap* et pourcentages cumulés *prccum* pour chaque composante :

$$\begin{aligned} prcvap_k &= \frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^{d} \lambda_i} \times 100, \\ prccum_k &= \sum_{j=1}^{k} prcvap_k \quad k = 1, 2, ...d, \end{aligned} \tag{2.39}$$

avec λ_k les valeurs propres de chaque composante k pour un nombre d de descripteurs.

Une base orthogonale peut être créée en prenant les premiers vecteurs propres dont la direction suit les plus grandes variances des données. Ainsi, les directions pour lesquelles les données ont la plus grande quantité d'énergie significative peuvent être trouvées. Au lieu d'utiliser tous les vecteurs propres de la matrice de covariance, on peut représenter les données avec quelques vecteurs de la base orthogonale. Si A_K $(d \times K)$ est la matrice qui contient les K premiers vecteurs propres associés aux K plus grandes valeurs propres, en transformant le vecteur de données $\mathbf{X}$, on obtient :

$$y = \mathbf{X} A_K, \tag{2.40}$$

qui représente les nouvelles coordonnées des n formes dans le système orthogonal de coordonnées défini par les vecteurs propres.

L'analyse en composantes principales est appliquée à la matrice (avec $n \times d$ dimensions) des descripteurs temporels obtenus à partir des n signatures acoustiques d'EA. La projection en ACP dans un espace à deux dimensions (Fig. 2.2), obtenue en ne retenant que deux composantes principales parmi les plus significatives, permet de faire ressortir les similitudes entre les formes. Si les données ne se recouvrent pas trop, une classification automatique entre les classes peut être considérée. Ainsi, le choix des descripteurs les plus pertinents pour composer les vecteurs de forme peut être validé.

L'ACP est aussi utilisée pour visualiser les classes obtenues par la classification automatique réalisée avec la méthode de coalescence floue (Fig. 2.3). Cette visualisation va permettre d'interpréter et de valider la classification obtenue.

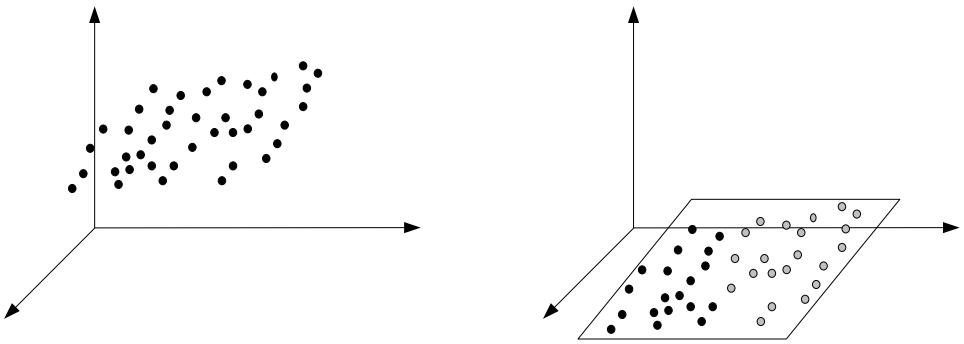


FIG. 2.2 – Illustration de l'ACP : le nuage de points initialement représenté dans un espace de dimension 3 (à gauche) est projeté par ACP dans un plan (à droite) dans lequel la séparation des formes en deux classes atteste de la pertinence des composantes des formes.

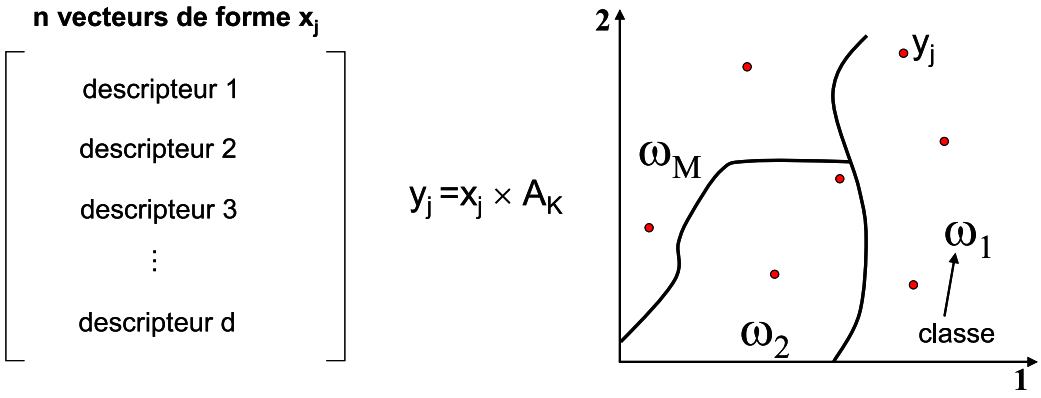


FIG. 2.3 – Visualisation par ACP des classes obtenues par coalescence floue. La classification n'étant pas visualisable dans un espace de dimension d, chaque forme x_j définie à gauche est projetée en y_j par ACP dans un espace de dimension inférieure à droite permettant de visualiser la structuration en classes donnée par l'algorithme de coalescence.

2.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'approche pour la classification non supervisée de données suivant une méthode de coalescence floue. L'algorithme FCM réalise une partition floue d'un ensemble d'observations en un nombre connu *a priori* de classes. Le résultat obtenu dépend de l'initialisation des centres des classes, ainsi que du choix de la métrique employée pour le calcul des distances et des différents paramètres de l'algorithme (M, f, ϵ). Le nombre de classes M est le paramètre le plus important, les autres paramètres ont une influence mineure au niveau de la partition, en comparaison avec les effets du nombre de classes. Ceci implique de réitérer plusieurs fois l'algorithme avec des valeurs différentes, puis de sélectionner la meilleure partition (voir section 2.7).

L'objectif de cette analyse statistique multivariable est de discriminer les signatures acoustiques de matériaux composites sollicités mécaniquement et de rendre l'interprétation des données plus aisée. Cette étude peut se décomposer en plusieurs étapes :

- acquisition des données d'EA par expérimentation,
- extraction de paramètres à partir des données d'EA,
- sélection des descripteurs les plus pertinents,
- choix du nombre de classes,
- application de l'algorithme de reconnaissance de formes : méthode de la coalescence floue,
- analyse en composantes principales,
- visualisation des données classifiées,
- interprétation et validation des résultats : la problématique est la validité de la partition en classes obtenue des données. Pour pouvoir valider si les similitudes observées entre les signaux d'une même classe correspondent à un même mécanisme d'endommagement, ou inversement si les différences entre les classes correspondent à différents mécanismes d'endommagement, deux méthodes sont utilisées. La première consiste à effectuer des tests sur des matériaux modèles bien connus. Ainsi, les essais sur des matrices seules et sur des composites unidirectionnels sollicités dans différentes directions permettant d'isoler les phénomènes d'endommagement vont permettre de valider les classifications. La seconde méthode consiste à étudier les caractéristiques (ou composantes) des formes de chacune des classes pour pouvoir valider la partition obtenue.
- identification de chaque classe à au moins un mécanisme d'endommagement dans le matériau.

Les résultats obtenus à partir de cette méthodologie sont développés dans le chapitre 3 suivant. Cette méthode est d'abord testée sur des matériaux modèles bien connus pour être validée puis elle est appliquée à des matériaux plus complexes.

Chapitre 3

Résultats : Discrimination des mécanismes d'endommagement par EA

Ce chapitre présente les résultats obtenus avec la méthode de classification présentée au chapitre 2 précédent, composée de la méthode de coalescence floue et d'une ACP. Cette méthode est d'abord appliquée à des matériaux "écoles" bien connus (résines, composites unidirectionnels) afin d'être validée puis des matériaux plus complexes sont étudiés tels que des composites à plis croisés, des bétons polymères élaborés au laboratoire et des composites industriels tels que les Sheet Molding Compound (SMC). Ces matériaux sont soumis à différentes sollicitations mécaniques telles que traction simple, fluage en traction, flexion quasi statique trois points.

La première partie de ce chapitre présente la procédure expérimentale suivie. Ensuite, les résultats obtenus sur des composites de type fibre/matrice sont présentés. La dernière partie est consacrée à l'analyse des bétons polymères.

3.1 Procédure expérimentale

Le travail proposé porte sur la discrimination, à partir des signaux d'EA, des mécanismes d'endommagement des matériaux composites de type fibre/matrice et des bétons polymères présentés au chapitre 1 en section 1.1. Nous étudions plus particulièrement des composites unidirectionnels, des composites à plis croisés, des composites de type SMC et des bétons polymères de constitution différente.

Ainsi, la méthode de classification choisie de coalescence floue associée à une analyse en composante principale est d'abord appliquée à un composite unidirectionnel bien connu sollicité en traction quasi statique, pour lequel les mécanismes sources d'EA ont déjà été identifiés avec succès dans une étude préalable faite par Huguet [3], afin de valider la méthode choisie. Ensuite la méthode est appliquée à des matériaux composites plus complexes tels que des composites plis croisés et des composites SMC de fabrication industrielle sollicités en fluage en traction et en flexion quasi statique trois points. Enfin des matériaux moins bien connus en terme de comportement mécanique tels que les bétons polymères sollicités en flexion quasi statique trois points sont étudiés.

La figure 3.1 présente les signaux typiques enregistrés pendant les essais d'EA, correspondant aux principaux mécanismes d'endommagement pouvant intervenir dans les matériaux composites fibre/matrice

(voir chapitre 1 section 1.2 et section 1.4).

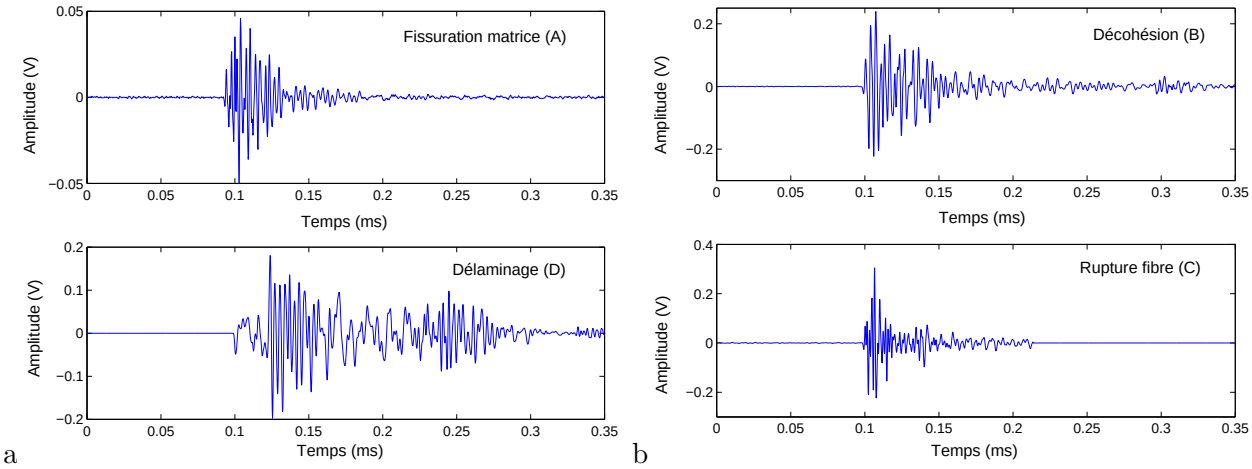


FIG. 3.1 – Composite multicouche à plis croisés, matrice époxy et renforts fibres de verre : (a)Signaux typiques de la fissuration matricielle et du délaminage. (b)Signaux typiques de la décohésion interface fibre-matrice et de rupture de fibre. Ces signaux contiennent 2048 points échantillonnés à 5MHz.

Afin d'identifier les signatures acoustiques correspondant aux différents mécanismes d'endommagement présents dans le béton polymère (voir section 1.2.3), nous nous intéressons dans un premier temps à des échantillons de bétons de formulations différentes en terme de matrice et de renfort. Ces essais supplémentaires vont nous permettre de relier plus facilement les événements détectés par EA aux mécanismes d'endommagement de ces matériaux. Les différents types d'échantillons de béton choisis sont présentés dans le tableau 3.1 : résine pure, granulats et résine, sable fin et résine, béton polymère. Ils sont élaborés à partir d'une matrice époxyde avec différents dosages des éléments constitutifs d'un béton polymère. Les différents dosages choisis pour ces échantillons ont pour objectif de pouvoir isoler certains types d'endommagement afin de rendre l'étude plus aisée (en gardant si possible les mêmes proportions de matrice et de renforts) et de valider les identifications réalisées sur le béton.

Constituants	**Echantillons**			
	Béton	Sable + Résine	Résine	Granulats + Résine
Granulats (%)	30	0	0	70
Sable (%)	40	70	0	0
Résine époxy(%)	30	30	100	30

TAB. 3.1 – Compositions des échantillons de béton polymère.

Le tableau 3.2 résume les différents essais présentés dans ce chapitre. A noter que ces essais sont conduits jusqu'à la rupture des éprouvettes et que l'EA est suivie simultanément. Les vitesses moyennes des ondes estimées expérimentalement ainsi que le seuil d'acquisition des signaux d'EA selon le type d'échantillon sont également présentés dans ce tableau.

Matériaux composites	Essais mécaniques	Vitesse des ondes (m/s)	Seuil d'acquisition (dB)
Unidirectionnels à 45° verre/époxy	Traction quasi statique	3000	35
Plis croisés $[\pm 62°]_{12}$ verre/polyester	Fluage en traction	2700	32
SMC	Fluage en traction Flexion trois points	2700 2700	40 40
Plis croisés $[90°0°]_8$ verre/époxy	Flexion trois points	3200	40
Béton polymère	Flexion trois points	3000	38
Sable + résine	Flexion trois points	2500	42
Résine époxy	Flexion trois points	2000	38
Granulats + Résine	Flexion trois points	3000	42

TAB. 3.2 – Matériaux composites étudiés, essais mécaniques réalisés, vitesses de propagation des ondes mesurées et seuils d'acquisition des signaux d'EA utilisés.

Notre contribution consiste à analyser les événements détectés par émission acoustique (EA), identifier les signatures acoustiques de chaque mécanisme d'endommagement intervenant dans les matériaux, suivre l'évolution des différents types d'endommagement au cours des essais et identifier les mécanismes les plus critiques conduisant à la rupture de chaque type de composites.

3.2 Application aux matériaux composites de type matrice/fibre

3.2.1 Essais de traction sur des composites unidirectionnels

Des matériaux composites unidirectionnels verre/époxy présentant des fibres à 45° par rapport à la direction de sollicitation sont étudiés dans cette partie [63, 64]. Les échantillons sont de forme parallélépipédique avec les dimensions : $20 \times 200 \times 3mm^3$ (voir figure 3.2). Ils sont soumis à des essais de traction quasi statique (voir chapitre 1 section 1.1.2).

Deux modes d'endommagement peuvent intervenir dans ces essais : fissuration matricielle et décohésion fibre/matrice (voir chapitre 1 section 1.2.2).

La figure 3.3 présente les histogrammes d'amplitude des salves d'EA (2131 salves) sur cet essai. Cette figure montre deux zones distinctes : une première gamme de signaux centrée sur 45dB et une autre autour de 70dB.

3.2.1.1 Evaluation du nombre de classes à prendre en compte

La méthode de classification utilisée (méthode de coalescence floue) nécessite la sélection du nombre de classes. Afin d'estimer le nombre de classes dans l'ensemble de données, des indices de validité des classes sont calculés (voir chapitre 2 section 2.7). Le nombre de classes qui optimise ces indices est alors choisi comme étant le nombre optimal de classes pour l'ensemble des données. Le Coefficient de Partition

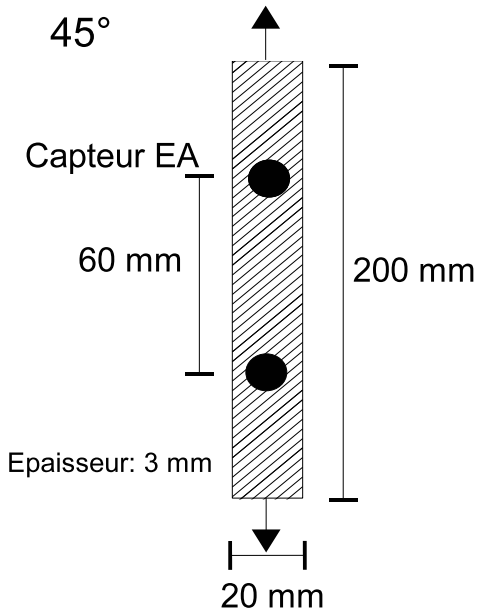


FIG. 3.2 – Dimensions des éprouvettes de composites unidirectionnels à 45° et position des capteurs d'EA pour un essai de traction quasi statique (vue de haut). Les flèches indiquent la direction de sollicitation en traction.

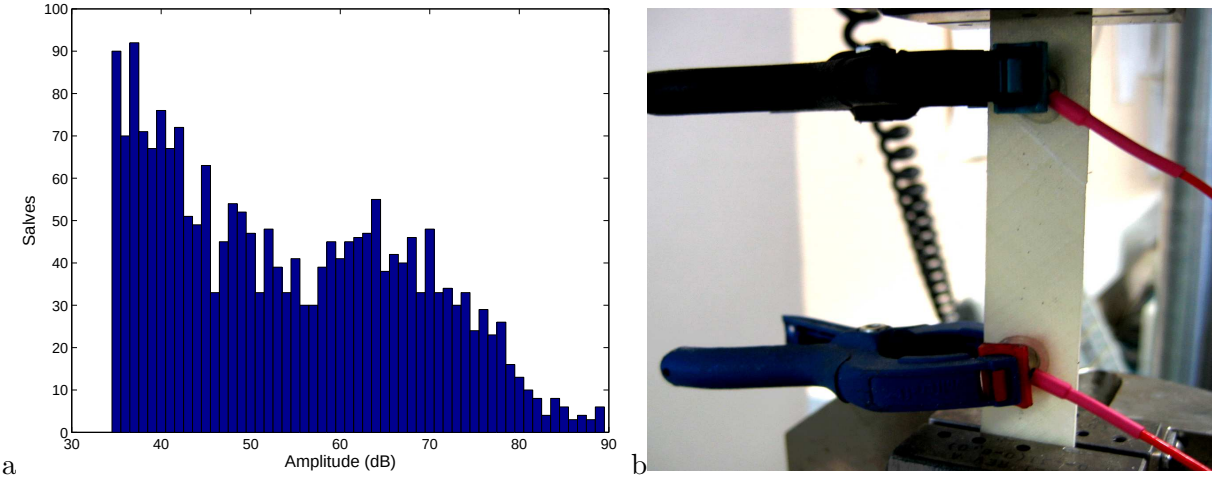


FIG. 3.3 – Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : (a) distribution d'amplitude des salves d'EA. (b) dispositif de mesure.

(CP) et l'Index de Partition (IP) sont calculés pour un essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45°. Le résultat présenté sur la figure 3.4 montre que le nombre de classes qui optimise CP est deux ou trois (valeur maximale de ce coefficient) et le nombre optimal pour IP est trois ou quatre classes (valeur minimale de ce coefficient). Cependant, comme il peut exister généralement plusieurs partitions envisageables pour un même jeu de données, la recherche d'une partition optimale n'est pas toujours évidente. Ces critères donnent une première indication sur le nombre réel de classes en présence dans le jeu de

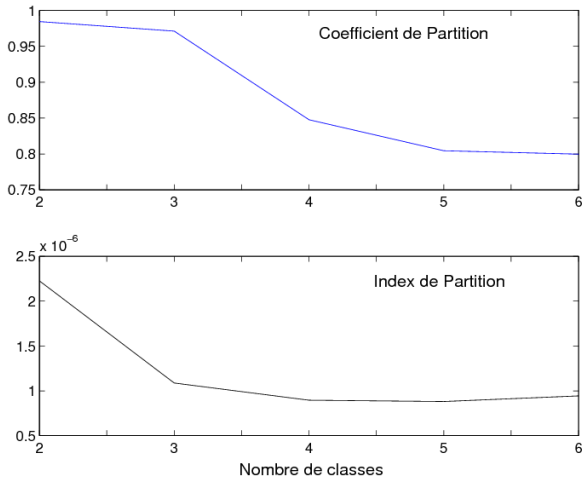


FIG. 3.4 – Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : indices de validité des classes.

données. Le choix définitif du nombre de classes à prendre pour effectuer la classification s'appuie sur la connaissance des types d'endommagement pouvant intervenir dans le matériau étudié. Pour ce composite unidirectionnel à 45°, les deux principaux modes d'endommagement identifiés étant les fissurations matricielles et les décohésions interfaciales fibre/matrice, la classification est effectuée avec deux classes.

3.2.1.2 Choix des descripteurs

Les descripteurs temporels calculés par le système d'acquisition d'EA sont : l'amplitude (dB), la durée (μs), l'énergie (U.A.) et l'énergie absolue (aJ), le temps de montée (μs), le nombre de coups, le nombre de coups au pic. La définition de ces descripteurs est donnée au chapitre 1 en section 1.3.4. Le choix des descripteurs les plus pertinents à prendre en compte pour la classification peut être fait par visualisation en analyse en composantes principales (voir chapitre 2 section 2.12).

L'ACP est effectuée sur les données de l'essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° en prenant tous les descripteurs. Les descripteurs sont représentés dans le plan composé des deux composantes principales de plus forte variance afin de corréler les descripteurs avec les axes de projection (voir figure 3.5).

Les profils des contributions des descripteurs sur les axes formés de la première et de la seconde composantes principales sont présentés en figure 3.6. Ces représentations montrent que le nombre de coups au pic est assez corrélé avec le temps de montée et la durée. Le nombre de coups au pic et le temps de montée apportant la même information sur les données, on retiendra le nombre de coups au pic comme premier descripteur. Le nombre de coups (liés à la durée) et l'énergie sont plus éloignés, ils sont sélectionnés comme descripteur 2 et 3. Enfin l'amplitude et l'énergie absolue sont assez corrélées, on retiendra l'amplitude comme dernier descripteur pour ces données. Ces quatre descripteurs (nombre de coups au pic, nombre de coups, énergie, amplitude) donnent une ACP avec le moins de recouvrement et sont sélectionnés afin de faciliter une classification automatique.

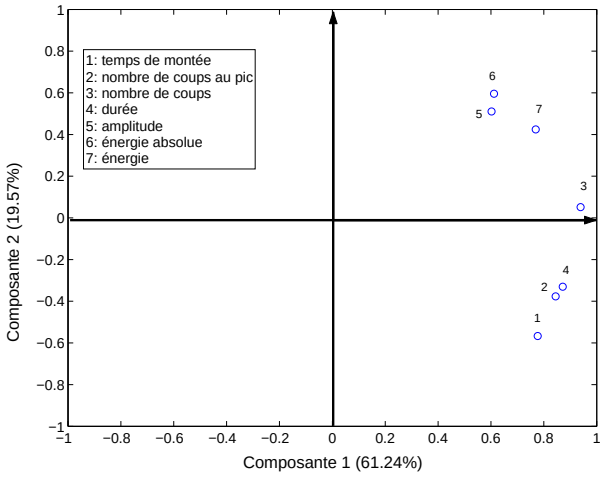


FIG. 3.5 – Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : visualisation par ACP des contributions des descripteurs sur les deux premiers axes : la première composante a une variance de 61.24% par rapport à la variance totale et la deuxième a une variance de 19.57% par rapport à la variance totale.

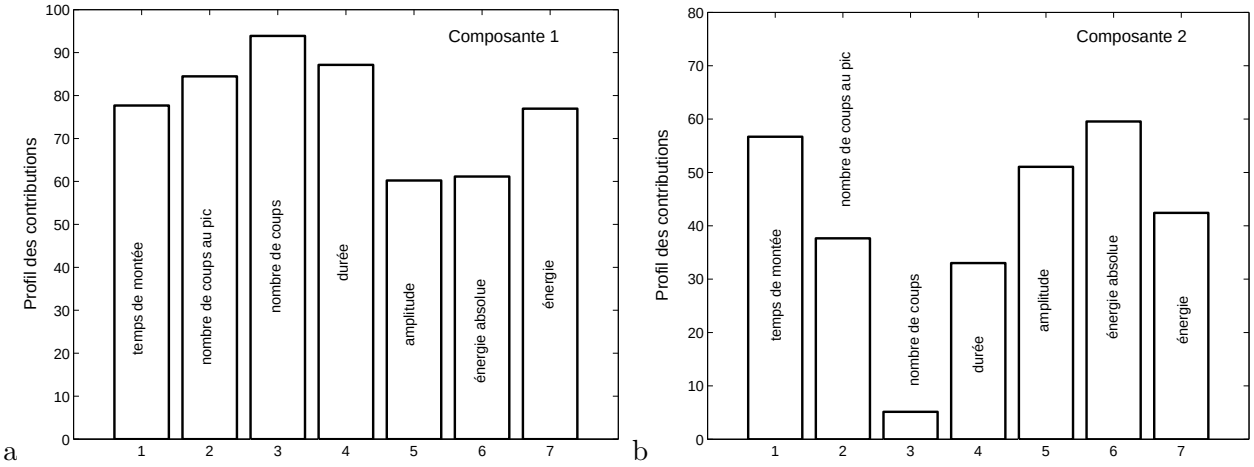


FIG. 3.6 – Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : visualisation par ACP des contributions des descripteurs sur les deux premiers axes : la première composante a une variance de 61.24% par rapport à la variance totale et la deuxième a une variance de 19.57% par rapport à la variance totale.

3.2.1.3 Analyse statistique multivariable et étiquetage des classes

L'analyse statistique multivariable est appliquée pour discriminer les types d'endommagement en relation avec les signaux d'EA. La méthode de coalescence floue est utilisée avec deux classes. L'affectation à une classe est attribuée en choisissant la classe à laquelle la forme a le plus haut degré d'appartenance. Ainsi, chacune des classes obtenues par la méthode de coalescence floue correspond à un mécanisme d'endommagement différent dans le matériau mais à ce niveau les mécanismes d'endommagement sont supposés inconnus. Pour associer chaque classe obtenue en sortie de l'algorithme de classification au mécanisme d'endommagement correspondant, les caractéristiques des vecteurs de forme de chaque classe sont considérées et comparées aux résultats trouvés dans la littérature concernant les caractéristiques des types d'endommagement dans les matériaux composites similaires [3, 5, 15, 34, 50] (voir chapitre 1 section

1.4).

L'amplitude des signaux d'EA étant un des paramètres temporels les plus discriminants, la distribution d'amplitude de chaque classe obtenue est analysée (figure 3.7). La classe présentée en haut de la figure 3.7 a une amplitude plus faible (centrée sur 55dB) que celle du bas (autour de 75dB). La classe du haut est donc associée aux fissurations matricielles et celle du bas aux décohésions interfaciales. Les

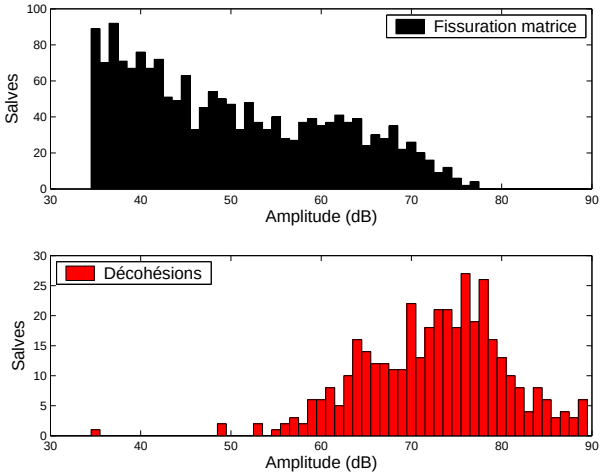


FIG. 3.7 – Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par application de l'algorithme de classification aux données.

autres caractéristiques des vecteurs de forme de chaque classe sont aussi considérées. Une synthèse des principaux paramètres pris en compte en fonction du type d'endommagement est présentée dans le tableau 3.3. Ces paramètres sont obtenus à partir de signaux typiques représentatifs de chaque mécanisme d'endommagement provenant d'essais spécifiques sur des échantillons modèles ou sur des matériaux composites bien connus trouvés dans la littérature [63]. Ainsi, les mécanismes d'endommagement peuvent

Matériaux	Type d'endommagement	Amplitude	Temps de montée	Energie	Durée
Composite fibre/matrice	Fissuration matricielle (type A)	35-65dB	>0.01ms (moyen)	$< 10^3$aJ	$\approx 0.1ms$ (moyenne)
	Décohésion interfaciale (type B)	50-80dB	<0.01ms (court)	$> 10^4$aJ	$\approx 0.1ms$ (moyenne)
	Rupture de fibre (type C)	75-100dB	<0.01ms (court)	$> 10^5$aJ	$\approx 0.05ms$ (courte)
	Délaminage (type D)	55-80dB	>0.02ms (lent)	$< 10^5$aJ	$> 0.15ms$ (longue)

TAB. 3.3 – Synthèse des paramètres temporels calculés sur les salves d'EA (avec 2048 points échantillonnés à 5MHz) en fonction du type d'endommagement correspondant pour un composite de type fibre/matrice.

être reliés aux différentes classes à partir des caractéristiques des formes appartenant à chaque classe.

L'ACP est ensuite appliquée aux données de l'essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° en prenant les quatre descripteurs : nombre de coups au pic, amplitude, nombre de coups et énergie. Les

valeurs propres obtenues à partir de la matrice de covariance (équation 2.36) des données correspondent aux variances de chaque composante. Le tableau 3.4 présente les variances en pourcentages *prcvap* et pourcentages cumulés *prccum* (équation 2.39) calculées pour chaque composante.

Descripteurs	nombre de coups au pic	amplitude	nombre de coups	énergie
λ	2.7161	0.73843	0.42106	0.1244
prcvap	67.90	18.46	10.53	3.11
prccum	67.90	86.36	96.89	100

TAB. 3.4 – Valeurs propres λ, variances en pourcentages *prcvap* et variances en pourcentages cumulés *prccum* pour chaque descripteur.

La figure 3.8 permet de voir que les deux premières valeurs propres contiennent 86% de la variance totale donc les deux premières composantes sont suffisantes pour décrire les données. Les données seront donc visualisées dans un espace à deux dimensions si le pourcentage d'informations sauvegardées par l'ACP est élevé (supérieur à 70%).

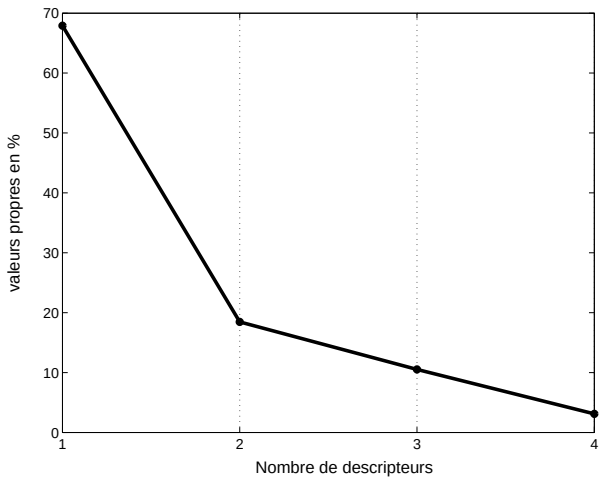


FIG. 3.8 – Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : Valeurs propres en pourcentage en fonction du nombre de descripteurs utilisés pour l'ACP.

L'analyse en composantes principales est donc appliquée sur des données en dimension quatre afin de visualiser les résultats de la classification dans un espace à deux dimensions (figure 3.9). Deux classes correspondant aux mécanismes d'endommagement de fissurations matricielles et de décohésions interfaciales sont mises en évidence. La chronologie d'apparition des deux types d'endommagements est présentée en figure 3.10. Cette figure montre que les microfissurations matricielles sont prépondérantes, elles apparaissent dès le début des essais et correspondent à 85% des signaux d'EA. Les décohésions interfaciales interviennent en fin d'essais et leur nombre croît jusqu'à la rupture du matériau (15% des événements d'EA).

La méthode de classification proposée donne de bons résultats et présente deux avantages : une analyse multivariable et une classification non supervisée. Plusieurs paramètres peuvent être utilisés ensemble

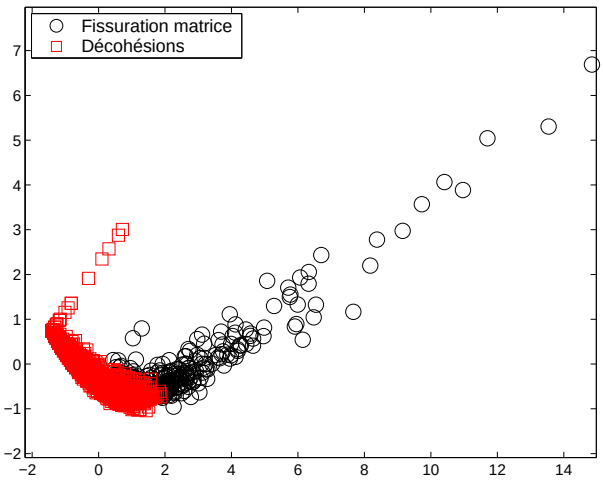


FIG. 3.9 – Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue avec les descripteurs temporels (86% d'informations sauvegardées).

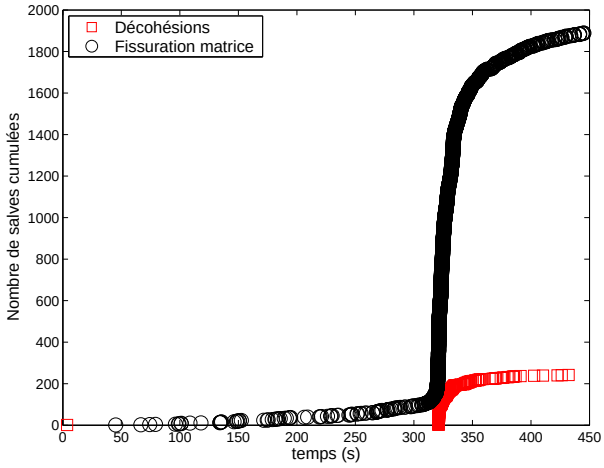


FIG. 3.10 – Essai de traction sur un composite unidirectionnel à 45° : chronologie d'apparition des deux mécanismes d'endommagement pendant l'essai.

dans une seule analyse multidimensionnelle et aucune base de données contenant des classes de signaux étiquetés en terme de mécanismes d'endommagement n'est nécessaire pour effectuer la classification (non supervisée).

3.2.2 Essais de fluage en traction sur des composites à plis croisés et SMC

Les matériaux étudiés dans cette partie sont des composites SMC et des composites à plis croisés $[\pm 62°]_{12}$ verre/polyester (voir chapitre 1 section 1.1.1.1) [10, 63, 65–67]. Les échantillons sont de forme parallélépipédique avec les dimensions : $10 \times 100 \times 3mm^3$ (voir figure 3.11). Ces matériaux sont soumis à des essais de fluage en traction à l'aide d'une machine hydraulique INSTRON avec une contrainte de

15MPa pour le plis croisés et de 48MPa pour le composite SMC (voir chapitre 1 section 1.1.2).

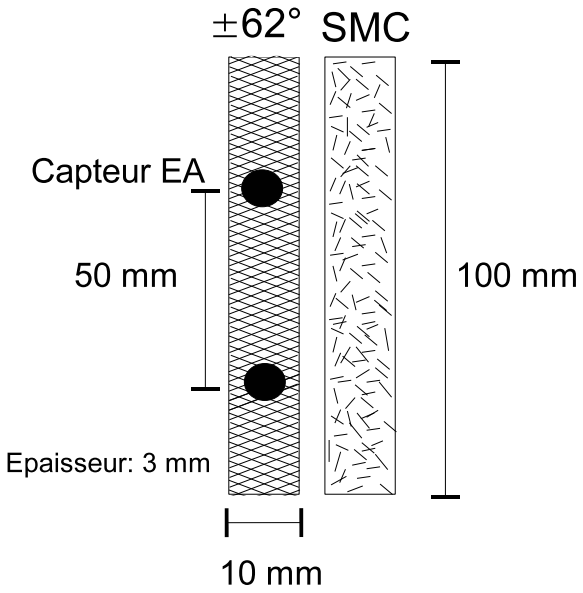
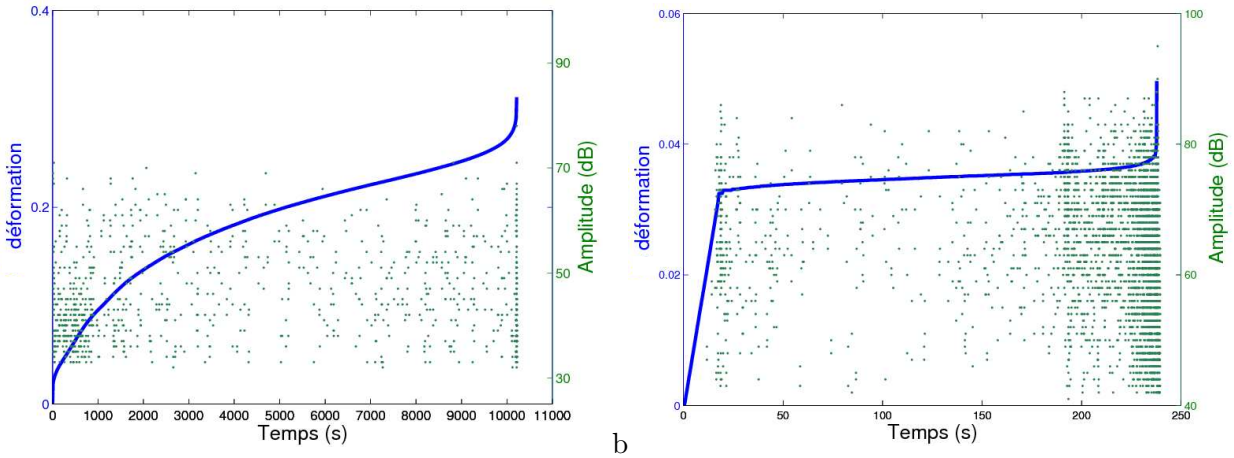


FIG. 3.11 – Dimensions des éprouvettes de composites à plis croisés $[\pm 62°]_{12}$ et de SMC, position des capteurs d'EA pour un essai de fluage (vue de haut).

La figure 3.12 présente l'amplitude des salves d'EA sur ces essais ainsi que les réponses en déformation aux essais de fluage. L'essai sur le composite à plis croisés présente 1074 salves et celui sur le composite SMC 3427 salves d'EA.



a b

FIG. 3.12 – Déformation appliquée et amplitude des salves d'EA lors d'essais de fluage : (a) échantillon de composite à plis croisés orientés à $[\pm 62°]_{12}$. (b) échantillon de composite SMC.

Différents mécanismes d'endommagement ont été identifiés sur des matériaux composites de type

fibre/matrice à partir de leur signaux d'EA (voir chapitre 1 section 1.2) [3]. Les types d'endommagement identifiés dans les composites à plis croisés sont : la fissuration matricielle (caractérisée par des signaux de type A), les décohésions de l'interface fibre/matrice (signaux de type B) et les délaminages inter-plis (signaux de type D). Les endommagements identifiés sur les composites SMC sont : la fissuration matricielle (signaux de type A), les décohésions de l'interface fibre/matrice (signaux de type B) et les ruptures de fibre (signaux de type C).

3.2.2.1 Evaluation du nombre de classes à prendre en compte

L'analyse statistique multivariable est appliquée dans le but de discriminer les différents mécanismes intervenant dans ces matériaux à partir des caractéristiques des signaux d'EA. Afin de déterminer le nombre de classes présentes pour chaque essai, les critères de validité Coefficient de Partition (CP) et l'Index de Partition (IP) sont utilisés. D'après l'évolution de ces critères (figure 3.13), en particulier le IP, en respectant le nombre de classes et en considérant que les trois mécanismes d'endommagement cités ci-dessus sont généralement les plus importants pour ces types de matériau, la classification est considérée comme un problème à trois classes dans les deux cas.

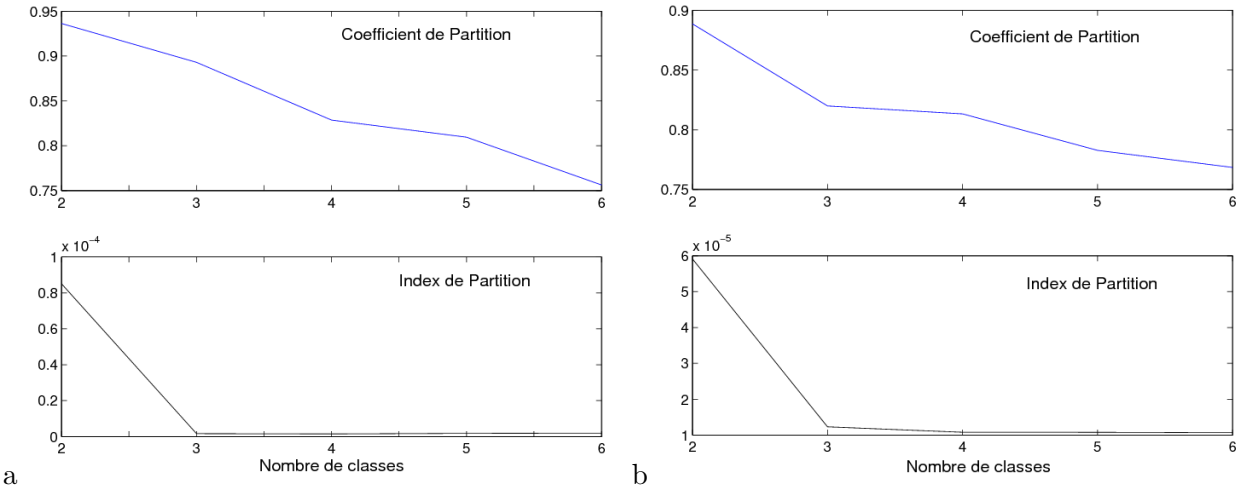


FIG. 3.13 – Indices de validité des classes : (a) Essai de fluage sur un composite à plis croisés orientés à $[\pm 62°]_{12}$. (b) Essai de fluage sur un composite SMC.

3.2.2.2 Analyse statistique multivariable

Ainsi, la classification par la méthode de coalescence floue est appliquée en prenant trois classes. Les cinq descripteurs utilisés pour former le vecteur forme sont l'énergie, le temps de montée, le nombre de coups, l'amplitude et la durée des signaux d'EA. Une analyse en composante principale est effectuée dans le but de visualiser les résultats obtenus dans un espace à deux dimensions (figure 3.14). La représentation montre que la plupart des formes sont concentrées. De plus, la séparation entre les trois classes obtenues par coalescence floue est cohérente avec la localisation des formes donnée par l'ACP. La classification des

données faite par l'algorithme des C-means semble pertinente car elle est compatible avec la représentation fournie par l'ACP. Les ensembles de points regroupés dans certaines classes ne sont pas enchevêtrés dans la projection obtenue par l'ACP même si les frontières entre les classes ne sont pas indiscutables. Afin de savoir si les trois classes identifiées correspondent à des mécanismes d'endommagement différents, les caractéristiques des formes de chacune des classes sont comparées à celles de signaux typiques représentatifs des différents mécanismes d'endommagement pouvant intervenir dans les composites base polymère de type fibre/matrice (voir tableau 3.3).

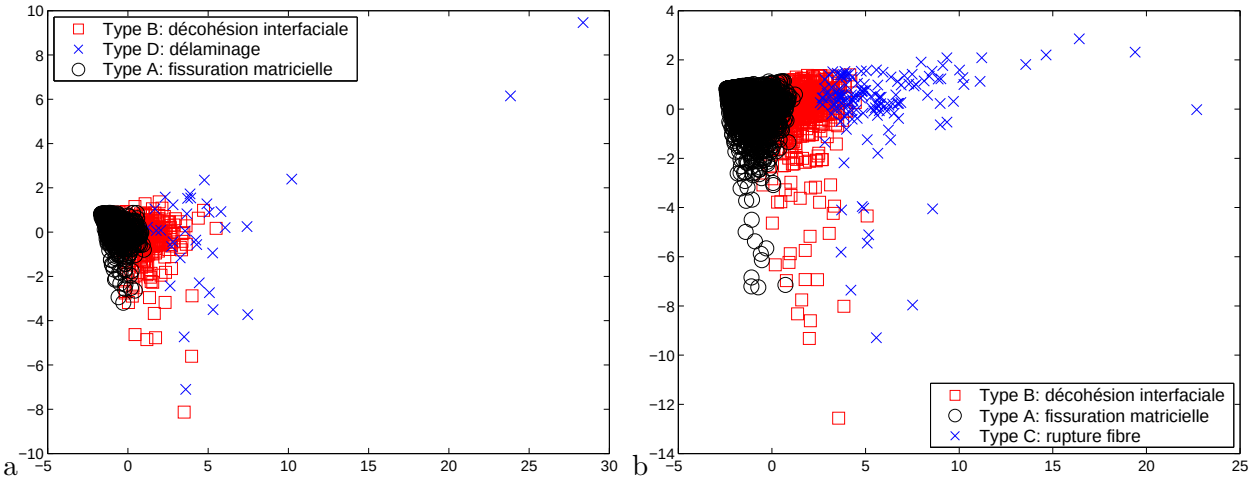


FIG. 3.14 – Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue avec les descripteurs temporels : (a) échantillon de composite à plis croisés orientés à $[\pm 62°]_{12}$ (82% d'informations sauvegardées). (b) échantillon de composite SMC (89% d'informations sauvegardées).

Une fois les formes étiquetées en termes de mécanismes d'endommagement et puisque le temps d'arrivée de chaque salve d'EA est enregistré, il est possible de suivre l'évolution des différents mécanismes d'endommagement avec le temps (figure 3.15). Cette visualisation montre qu'avant chaque rupture du matériau, les fissurations matricielles sont les endommagements les plus prépondérants. Elles débutent dès l'application de la contrainte mécanique et correspondent à beaucoup plus de salves d'EA que les autres mécanismes (elles représentent 55% des salves d'EA pour le composite SMC et 65% pour le composite à plis croisés). Les décohésions fibre-matrice commencent aussi au début des essais et leur nombre augmente progressivement pendant les essais (35% de salves d'EA pour le SMC et 30% pour le plis croisés). Pour le composite à plis croisés, les délaminages qui représentent seulement 5% des événements d'EA, apparaissent principalement en fin d'essai et conduisent à la rupture du matériau. Dans le cas du composite SMC, les ruptures de fibres (10% de salves d'EA) augmentent fortement en fin d'essai dans la zone de fluage tertiaire et mènent à la rupture de l'échantillon. On remarque que pour les deux matériaux la zone de fluage tertiaire est riche en EA (elle commence à 10000s pour le plis croisés et 180s pour le SMC). L'augmentation de l'activité acoustique dans cette zone constitue un signe annonciateur d'une rupture.

Pour le composite à plis croisés, on peut aussi noter que la courbe de déformation d'un essai de fluage a une allure identique à celle d'apparition des événements d'EA correspondant aux fissurations matricielles en fonction du temps (figure 3.16) [10]. Il semble que c'est la microfissuration matricielle qui contribue le

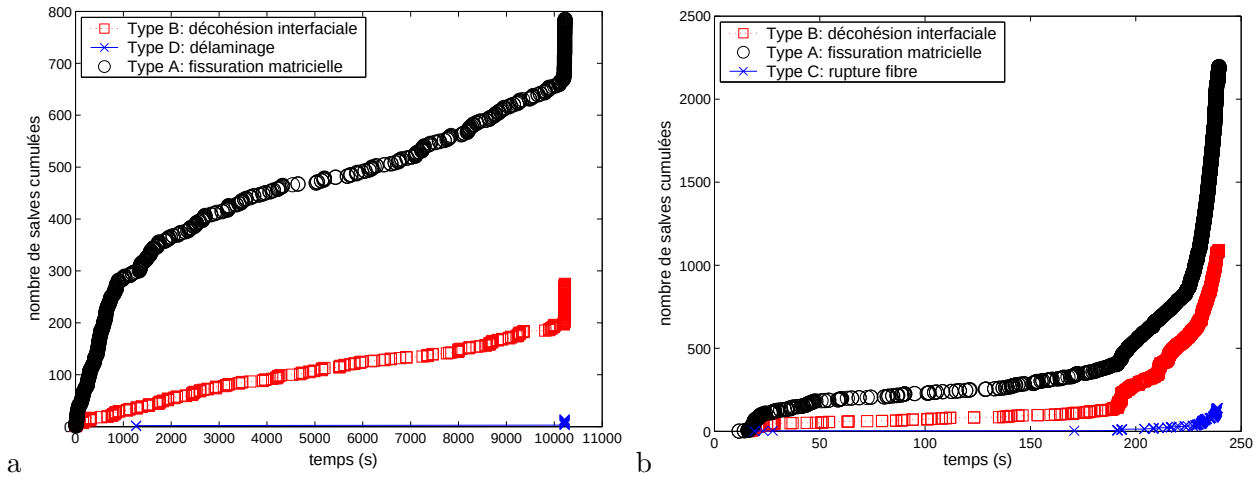


FIG. 3.15 – Chronologie d'apparition des différents mécanismes d'endommagement pendant des essais de fluage : (a) échantillon de composite à plis croisés orientés à $[\pm 62°]_{12}$. (b) échantillon de composite SMC.

plus au phénomène de déformation macroscopique du matériau.

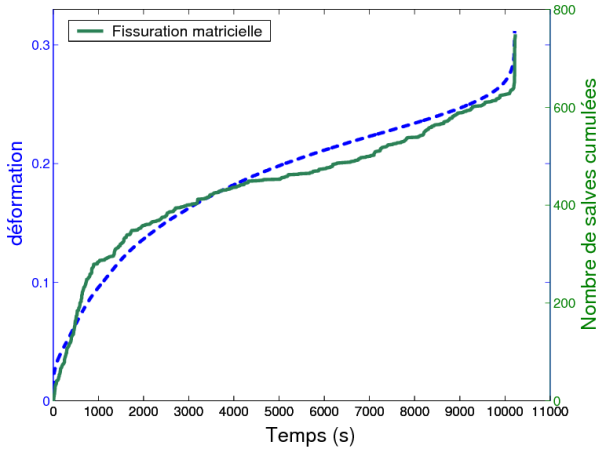


FIG. 3.16 – Echantillon de composite à plis croisés orientés à $[\pm 62°]_{12}$ sollicité en fluage : réponse en déformation et nombre de salves cumulées correspondant à la microfissuration matricielle.

3.2.3 Essais de flexion quasi statique trois points sur des composites à plis croisés et SMC

Les matériaux étudiés dans cette section sont des composites SMC et des composites à plis croisés $[90°0°]_8$ verre/époxy (voir chapitre 1 section 1.1.1.1) [10, 64, 68, 69]. Les échantillons sont de forme parallélépipédique avec les dimensions : $21 \times 280 \times 2mm^3$ (voir figure 3.17). Ces matériaux sont soumis à des essais de flexion quasi statique trois points avec une distance entre appuis extérieurs prise égale à 90mm.

La figure 3.18 présente l'amplitude des salves d'EA ainsi que les courbes de charge des essais de flexion

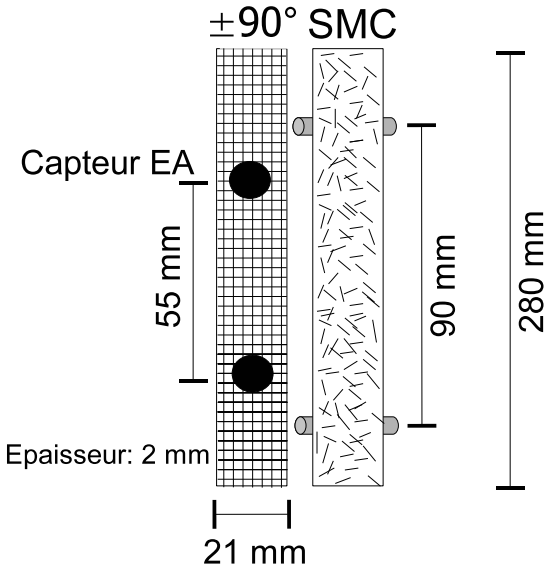


FIG. 3.17 – Dimensions des éprouvettes de composites à plis croisés $[90°0°]_8$ et de SMC, position des capteurs d'EA pour un essai de flexion quasi statique trois points (vue de haut).

trois points. L'essai sur le composite à plis croisés présente 3820 salves et celui sur le composite SMC est beaucoup plus émissif avec 10115 salves d'EA.

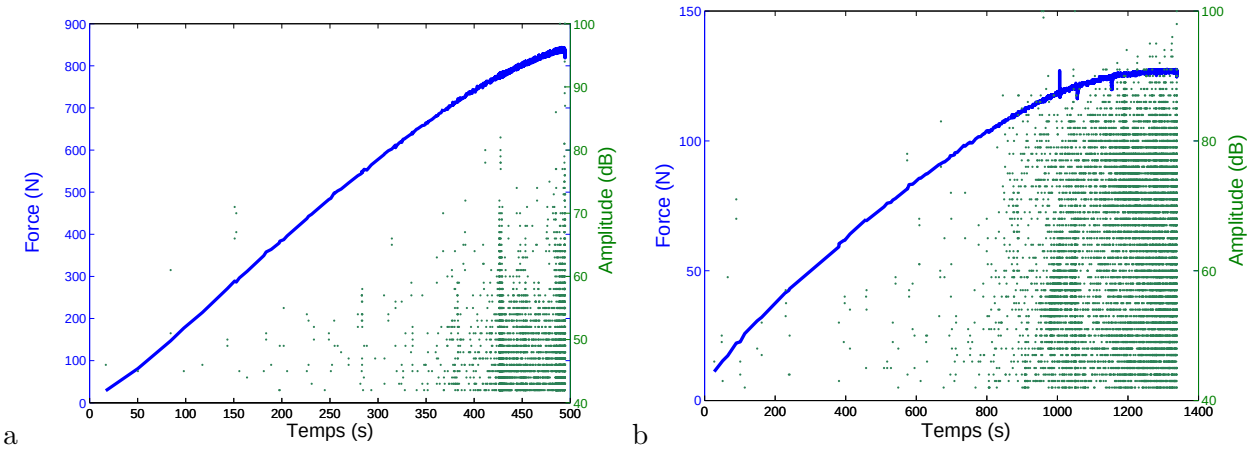


FIG. 3.18 – Déformation appliquée et amplitude des salves d'EA lors d'essais de flexion quasi statique trois points : (a) échantillon de composite à plis croisés $[90°0°]_8$. (b) échantillon de composite SMC.

Les mécanismes d'endommagement sont les mêmes que précédemment pour les essais de fluage sur les matériaux de même type, à savoir (voir chapitre 1 section 1.2) [3] : la fissuration matricielle (caractérisée par des signaux de type A), les décohésions de l'interface fibre/matrice (signaux de type B) et les délaminages inter-plis (signaux de type D) pour les composites à plis croisés et pour les composites

SMC : la fissuration matricielle (signaux de type A), les décohésions de l'interface fibre/matrice (signaux de type B) et les ruptures de fibre (signaux de type C) (voir tableau 3.3).

3.2.3.1 Evaluation du nombre de classes à prendre en compte

Les critères de validité CP et IP sont utilisés pour estimer le nombre de classes à prendre en compte pour l'analyse statistique multivariable. Ces deux coefficients sont tracés sur les figures 3.19 en fonction du nombre de classes pour les deux matériaux soumis à un essai de flexion trois points. Pour la figure 3.19a correspondant au composite à plis croisés, le CP suggère moins de quatre classes et le IP prend sa valeur minimale pour trois classes. Pour la figure 3.19b correspondant au composite SMC, le CP et le IP ont une valeur optimale pour trois classes. En conclusion, les deux essais sont considérés comme étant des problèmes de classification à trois classes.

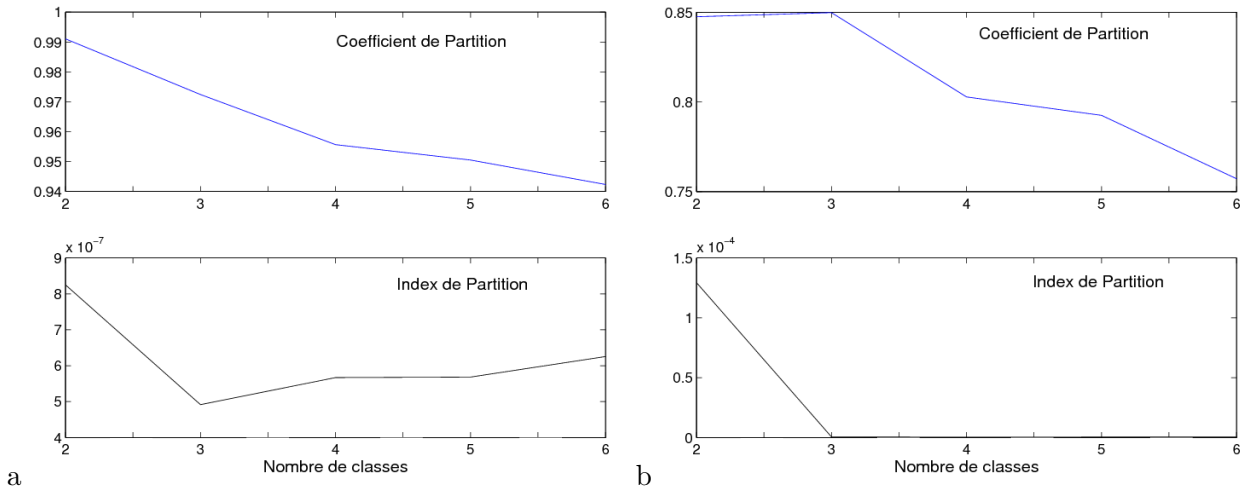


FIG. 3.19 – Indices de validité des classes : (a) Essai de flexion quasi statique trois points sur un composite à plis croisés orientés à $[90°0°]_8$. (b) Essai de flexion quasi statique trois points sur un composite SMC.

3.2.3.2 Analyse statistique multivariable

La classification par la méthode de coalescence floue est appliquée en prenant trois classes pour chaque essai. Les cinq descripteurs utilisés pour former le vecteur forme sont l'énergie, le temps de montée, le nombre de coups, l'amplitude et la durée des signaux d'EA. Une analyse en composantes principales est effectuée dans le but de visualiser les résultats obtenus dans un espace à deux dimensions (figure 3.20). La représentation montre que les formes se recouvrent plus pour le composite SMC.

L'évolution des différents mécanismes d'endommagement est présentée en fonction du temps sur la figure 3.21. Cette visualisation montre qu'avant chaque rupture du matériau, les fissurations matricielles sont les endommagements les plus prépondérants. Elles débutent dès l'application de la contrainte mécanique et correspondent à la majorité des salves d'EA. L'évolution des trois types d'endommagement en terme de chronologie d'apparition pour le composite SMC est assez similaire dans le cas d'un essai

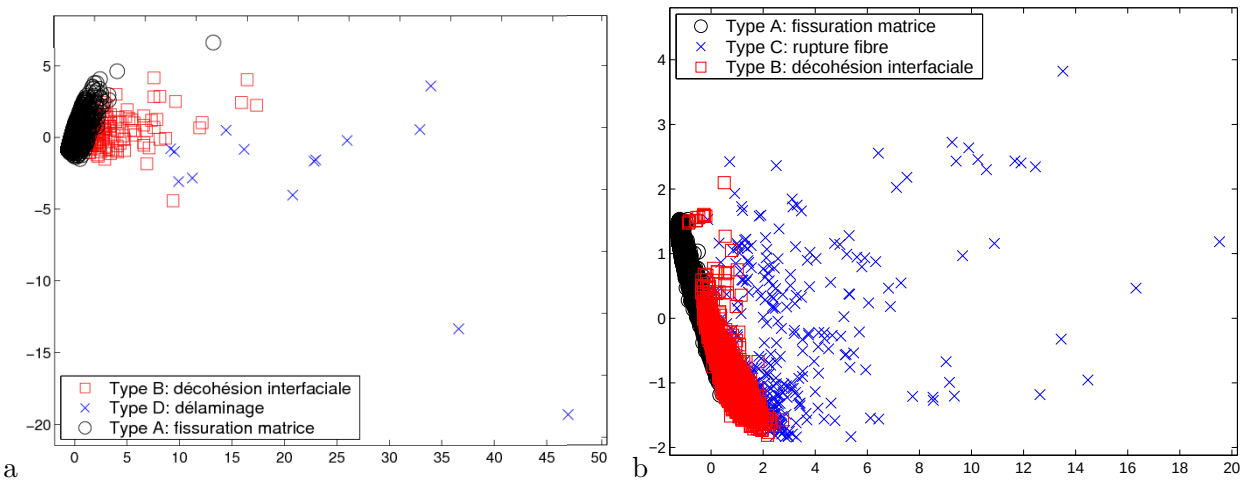


FIG. 3.20 – Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue avec les descripteurs temporels : (a) échantillon de composite à plis croisés orientés à $[90°0°]_8$ (86% d'informations sauvegardées). (b) échantillon de composite SMC (93% d'informations sauvegardées).

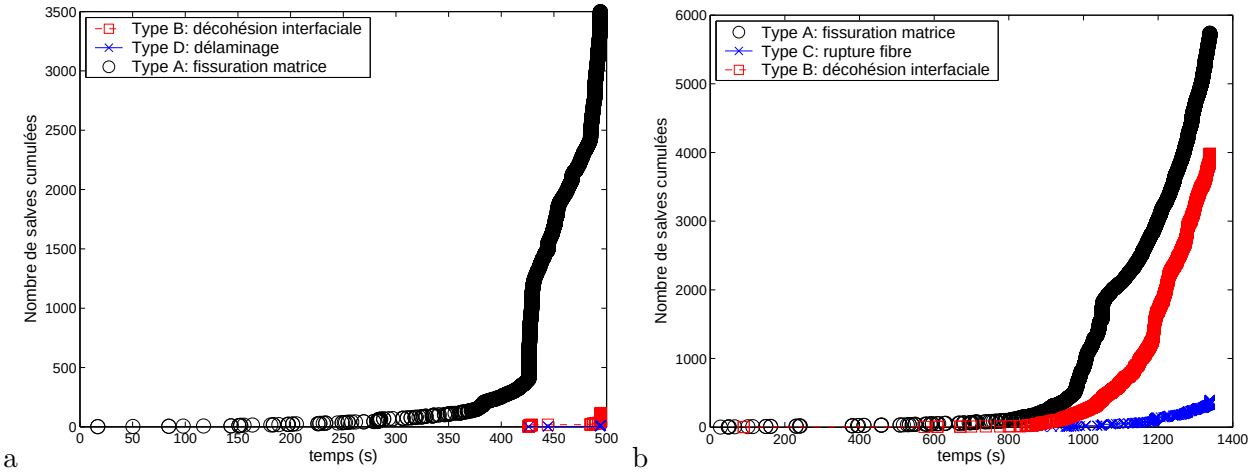


FIG. 3.21 – Chronologie d'apparition des différents mécanismes d'endommagement pendant des essais de flexion quasi statique trois points : (a) échantillon de composite à plis croisés orientés à $[90°0°]_8$. (b) échantillon de composite SMC.

de flexion quasi statique trois points et d'un essai de fluage : les décohésions fibre-matrice commencent dès le début des essais et leur nombre augmente progressivement jusqu'à la rupture, les ruptures de fibre augmentent fortement en fin d'essai et mènent à la rupture de l'échantillon. Dans le cas du composite à plis croisés $[90°0°]_8$, on observe quelques décohésions et délaminages en fin d'essai. A noter que le peu de délaminage est dû à l'épaisseur très faible du matériau.

3.3 Application aux matériaux composites de type béton polymère

Le béton à base polymère (voir chapitre 1 section 1.1) est l'objet d'un intérêt croissant dû à sa large gamme d'applications possibles notamment dans la construction civile. La connaissance des propriétés et du comportement statique du béton à base polymère n'est pas suffisante pour l'emploi de ce matériau dans certains secteurs. Afin de développer son usage, des informations complémentaires sur son comportement sont nécessaires, notamment son comportement à long terme et les mécanismes d'endommagement conduisant à la rupture de ce matériau.

L'objectif est d'étudier l'endommagement du béton polymère à partir des salves d'émission acoustique enregistrées par le système d'acquisition [64]. Pour cela, la connaissance des signatures acoustiques correspondant aux principaux modes d'endommagement dans ces matériaux est nécessaire (voir chapitre 1 section 1.2.3). Ainsi, des essais supplémentaires sur des échantillons de bétons de formulations différentes en terme de matrice et de renfort sont réalisés (tableau 3.1) afin de pouvoir isoler certains types d'endommagement.

Tous les échantillons sont sollicités dans les mêmes conditions en flexion trois points quasi statique avec une distance entre appuis extérieurs prise égale à 120mm et avec une vitesse de déplacement de 0.05 mm/mn (voir figures 3.22 et 3.23). Les dimensions des éprouvettes sont : L = 160mm, l = 40 mm et b= 15mm, où L, l et b sont respectivement la longueur totale, la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette. Les signaux d'EA sont échantillonnés avec une fréquence de 1 MHz.

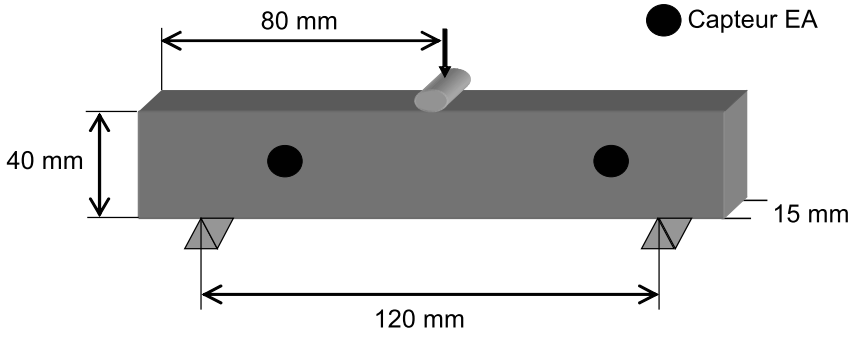


FIG. 3.22 – Géométrie des éprouvettes et position des capteurs d'émission acoustique.

La méthode de classification présentée au chapitre 2 est ensuite appliquée aux signaux d'EA obtenus sur les différents échantillons de béton [64]. Dans chacun des cas, les descripteurs utilisés pour la classification sont les descripteurs temporels usuels : temps de montée, amplitude, nombre de coups, durée, énergie.

Afin de pouvoir associer chaque classe obtenue en sortie de l'algorithme de classification au mécanisme d'endommagement correspondant : fissuration matricielle, rupture de l'interface agrégat/matrice (décohésion interfaciale) et rupture des agrégats (voir chapitre 1 section 1.2.3), les caractéristiques des formes de chaque classe sont prises en compte. En effet, chaque classe de signaux obtenue par la classification correspond à un mécanisme d'endommagement identifié dans le matériau hétérogène base polymère. Une

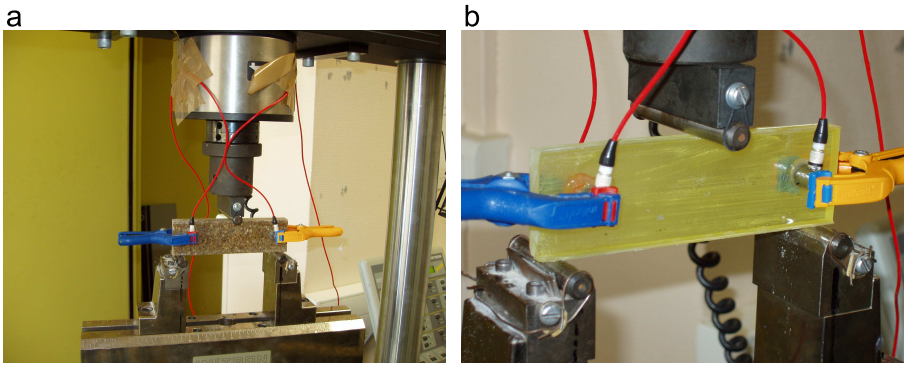


FIG. 3.23 – Essais de flexion quasi statique trois points : (a) Béton à base polymère. (b) Résine.

synthèse des principaux paramètres temporels calculés sur les salves d'EA en fonction des différents types d'endommagement a été effectuée pour un matériau de type béton polymère à partir des échantillons de constitution différente (section 3.3.4 tableau 3.5). L'étude de la distribution de ces paramètres pour chaque classe permet d'associer chaque classe à un mécanisme d'endommagement. De plus, afin de valider l'identification des mécanismes d'endommagement réalisée, des micrographies optiques et électroniques sont prises sur les échantillons après les essais de flexion au niveau de la zone de rupture. Ces micrographies sont obtenues à l'aide d'un microscope électronique optique à balayage (scanning electronic microscope-SEM) et d'un microscope optique. Elles permettent de voir quels types d'endommagement sont présents sur chaque échantillon au niveau de la zone de rupture.

Cette méthode nous permet d'identifier les salves acoustiques émises par chaque type d'endommagement et ainsi de suivre l'évolution des différents mécanismes d'endommagement au cours des essais afin d'identifier les plus critiques conduisant à la rupture de ces matériaux.

3.3.1 Echantillon composé de résine

Les tests de flexion trois points en statique sont réalisés sur des éprouvettes de résine époxyde pure (figure 3.24). L'objectif est d'identifier les salves d'EA provenant de la microfissuration matricielle. Un seul type de signal est observé dans ces tests avec une amplitude comprise majoritairement entre 38dB et 52dB (figure 3.24). On peut noter que cet essai est peu émissif en EA. Un signal typique de microfissuration matricielle, appelé signal de type A, est présenté sur la figure 3.41 récapitulative des signaux observés. La figure 3.25a présente une photographie de la zone de rupture d'un échantillon de résine pure et la figure 3.25b présente une micrographie électronique de l'endommagement matriciel observé après les tests.

3.3.2 Echantillon composé de gravier et de résine

Dans ces tests, des échantillons composés de 70% de granulats et 30% de résine époxyde sont étudiés (tableau 3.1). L'objectif est de générer des microfissurations matricielles, des décohésions interfaciales résine/granulats ainsi que des ruptures de granulats afin d'identifier les salves d'EA correspondantes.

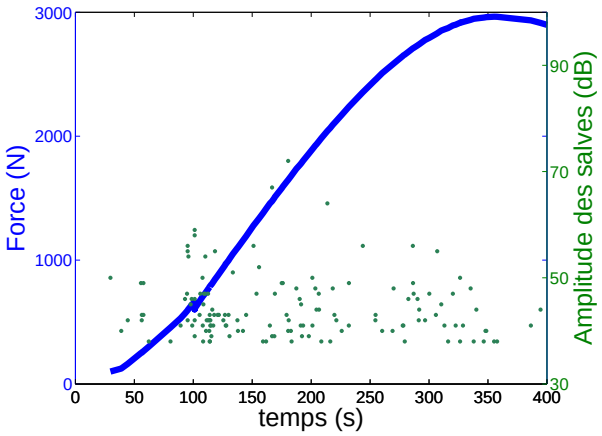


FIG. 3.24 – Force appliquée et amplitude des salves lors d'un essai de flexion quasi statique trois points sur un échantillon de résine.

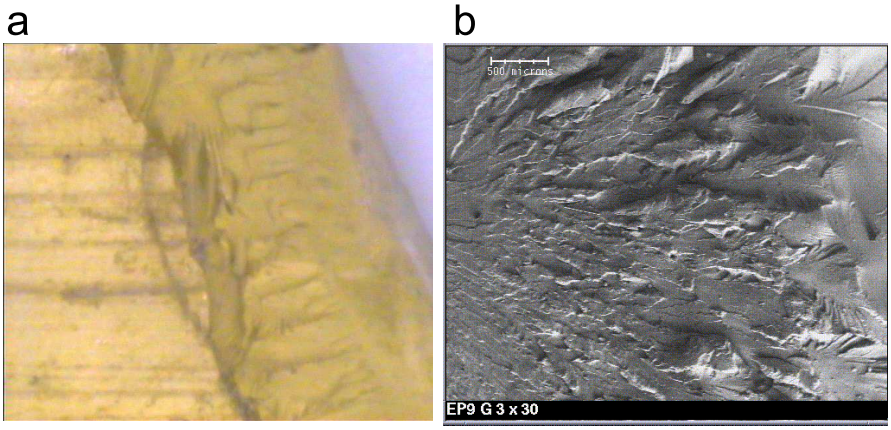


FIG. 3.25 – (a) Photographie de la zone de rupture d'un échantillon composé de résine pure. (b) Micrographie électronique de l'endommagement matriciel présent au niveau de la zone de rupture d'un échantillon composé de résine pure.

L'évolution de la charge appliquée au sein des matériaux durant un essai de flexion trois points en statique et le suivi de l'évolution de l'activité acoustique sont présentées en figure 3.26. On peut voir que cet essai est beaucoup plus émissif que celui sur le résine seule.

La classification est donc appliquée aux salves d'EA recueillies avec trois classes correspondant aux trois mécanismes d'endommagement attendus dans ce type de matériau. Les distributions d'amplitude de chacune des classes obtenues sont présentées en figure 3.27.

La première classe obtenue contient des signaux dont l'amplitude est comprise entre 42dB et 58dB. Ces signaux ont des paramètres d'EA identiques à ceux observés sur les échantillons de résine pure. Par conséquent, ces signaux proviennent de microfissurations matricielles (signaux de type A) (voir figure 3.41). La deuxième classe contient des signaux d'amplitude comprise entre 48dB et 85dB. Ces signaux

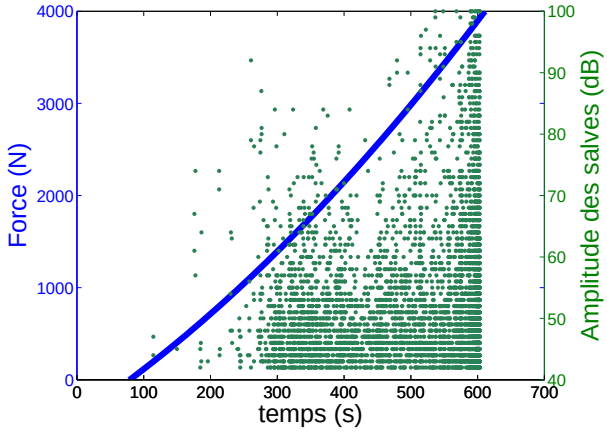


FIG. 3.26 – Force appliquée et amplitude des salves lors d'un essai de flexion quasi statique trois points sur un échantillon composé de granulats et de résine.

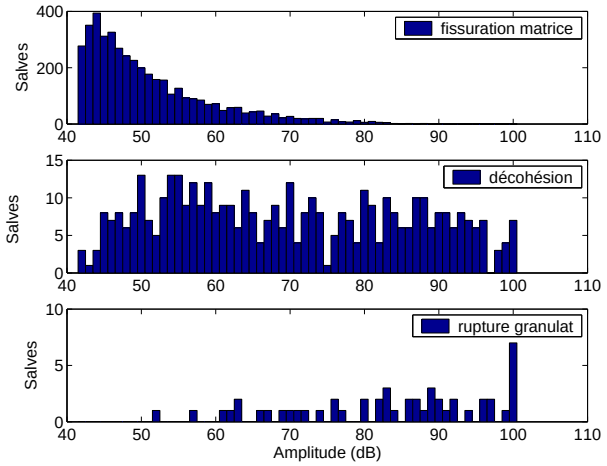


FIG. 3.27 – Distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par classification : échantillon composé de granulats et de résine.

sont en un nombre important et ils apparaissent juste après les microfissurations de la résine (voir figure 3.28). Ils sont probablement issus des décohésions des interfaces granulats/résine. Ces signaux sont appelés signaux de type B et un exemple de signal B est présenté en figure 3.42. Leurs caractéristiques sont très différentes de celles des signaux de type A, leur énergie est notamment beaucoup plus importante avec des temps de montée plus court. La dernière classe obtenue contient quelques signaux, eux aussi très énergétiques (au dessus de 95dB) mais ils apparaissent principalement en fin d'essai (voir figure 3.28).

Nous les attribuons à la rupture des granulats présents uniquement au niveau de la zone de rupture (figure 3.29). Ces signaux sont appelés signaux de type C (voir figure 3.43). La figure 3.30 présente une photographie de la zone de rupture de ce type d'échantillons et fait apparaître les trois types d'endommagement identifiés.

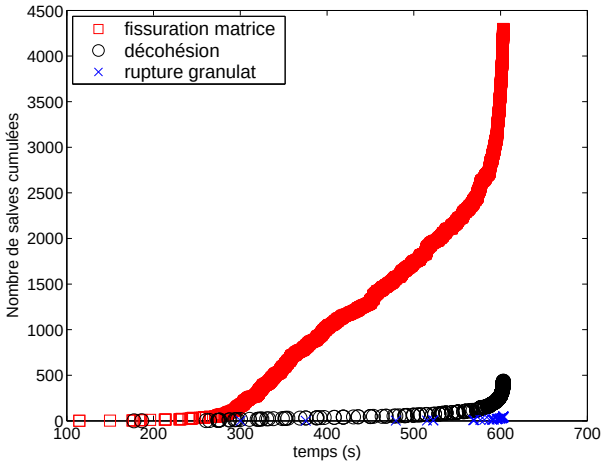


FIG. 3.28 – Chronologie d'apparition des trois types d'endommagement identifiés sur un échantillon composé de granulats et de résine.

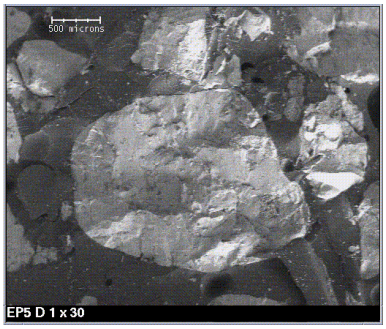


FIG. 3.29 – Micrographie d'une rupture de granulat observée au niveau de la zone de rupture d'un échantillon composé de gravier et de résine.

3.3.3 Echantillon composé de sable fin et de résine

Les tests de flexion trois points en statique sont effectués sur des échantillons composés de 70% de sable fin et de 30% de résine époxyde (figure 3.31). Cet essai présente une activité acoustique forte.

La classification appliquée aux salves d'EA permet de différencier deux classes différentes de signaux. 95% des signaux ont une amplitude comprise majoritairement entre 42dB et 60dB (figure 3.32), avec des paramètres d'EA identiques à ceux observés dans les deux précédents tests correspondant à la microfissuration matricielle et appelés signaux de type A (figure 3.41). 5% des signaux ont une amplitude principalement comprise entre 52dB et 80dB (figure 3.32). Ces signaux ont des paramètres d'EA qui se rapprochent plus de ceux des décohésions interfaciales observées précédemment sur les échantillons composés de résine et granulats mais ils sont beaucoup moins énergétiques (figure 3.42). Ainsi, ils correspondent aux décohésions interfaciales entre le sable et la résine. On peut aussi noter ici qu'il n'y a pas de signaux très énergétiques en fin d'essai que l'on avait observés sur les échantillons de résine/granulats.

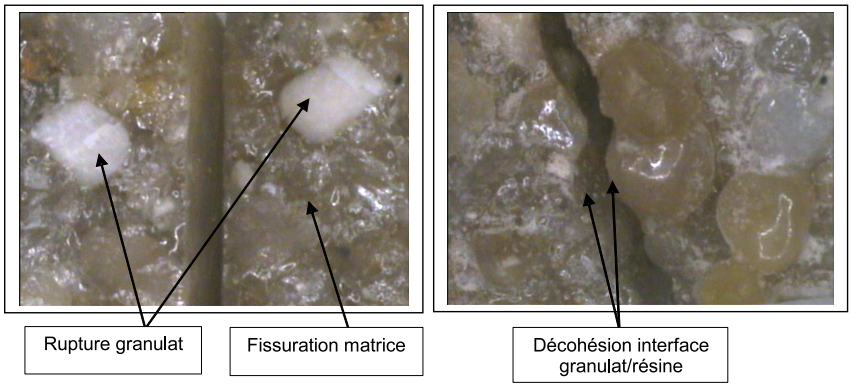


FIG. 3.30 – Photographie des trois mécanismes d'endommagement présents dans les échantillons composés de résine et granulats au niveau de la zone de rupture. L'image de gauche montre la zone de rupture en coupe des deux parties de l'éprouvette. On peut voir qu'un granulat s'est brisé à l'intérieur de l'éprouvette. L'image de droite présente une vue de dessus de la zone de rupture avec les deux parties de l'éprouvette accolées. On peut observer la décohésion entre la résine et un granulat présent en surface de l'éprouvette.

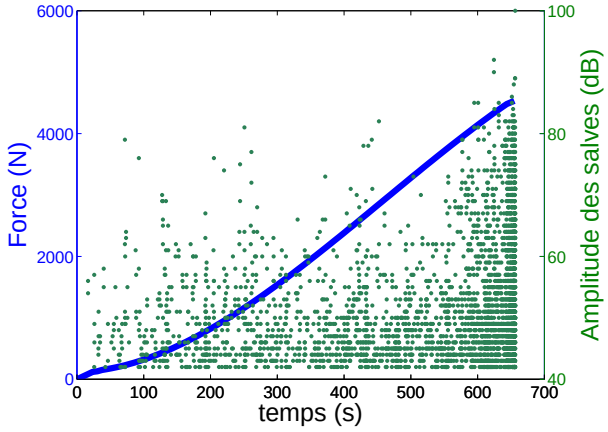


FIG. 3.31 – Force appliquée et amplitude des salves lors d'un essai de flexion quasi statique trois points sur un échantillon composé de sable fin et de résine.

Ainsi, on peut supposer que le sable fin ne se fracture pas en fin d'essai et n'est pas une source de signaux d'EA. La chronologie d'apparition des mécanismes d'endommagement est présentée en figure 3.33. On peut voir que les microfissurations matricielles sont présentes dès le début de l'essai et que leur nombre croît avec la charge alors que les décohésions liées à l'interface résine/sable apparaissent plus en fin d'essai. L'évolution des microfissurations matricielles est similaire à la figure 3.28.

Afin de valider les observations réalisées à partir de la classification, des micrographies électroniques sont effectuées après les tests. Elles permettent de visualiser les mécanismes d'endommagement qui ont mené à la rupture des échantillons. Sur la figure 3.34, on peut observer la microfissuration matricielle et une décohésion entre la résine et le sable fin à différentes échelles. Les grains de sable fin restent intacts comme l'atteste cette micrographie.

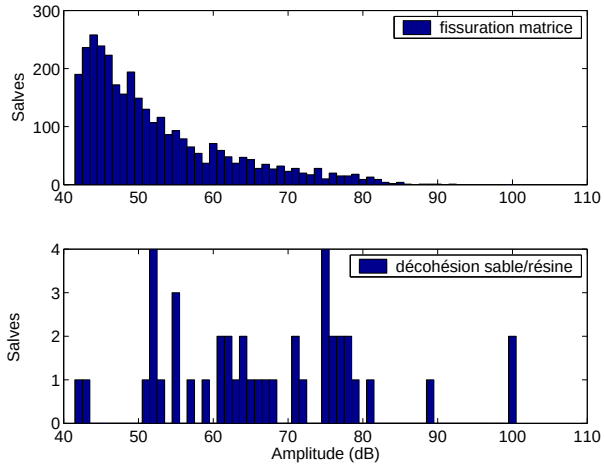


FIG. 3.32 – Distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par classification : échantillon composé de sable fin et de résine.

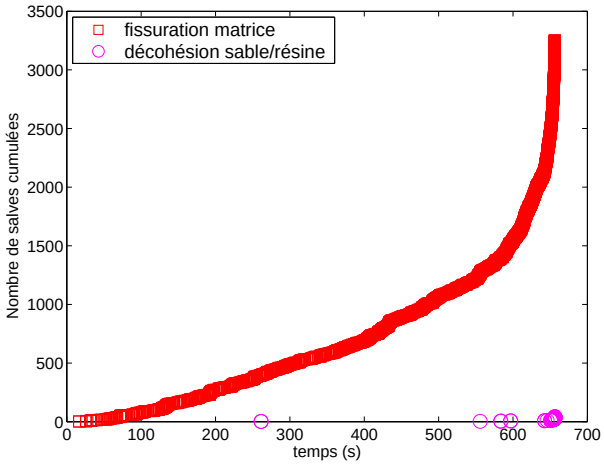


FIG. 3.33 – Chronologie d'apparition des trois types d'endommagement identifiés sur un échantillon composé de sable fin et de résine.

3.3.4 Echantillon de béton polymère

Les tests de flexion trois points en statique sont maintenant effectués sur des échantillons de béton polymères : 40% de sable fin, 30% de résine époxy et 30% de granulats (tableau 3.1). Au cours des essais, l'activité de l'émission acoustique croît avec l'évolution de la charge. L'émission acoustique, relativement faible en début d'essai, devient très importante et s'accélère juste avant la rupture. Cette accélération se poursuit jusqu'à rupture du matériau (figure 3.35).

L'analyse statistique multivariable des données d'EA est appliquée avec trois classes correspondant aux signatures acoustiques des trois types d'endommagement : fissurations matricielles, décohésions et ruptures de granulats. En effet, une classification à quatre classes ne permet pas de mettre en évidence

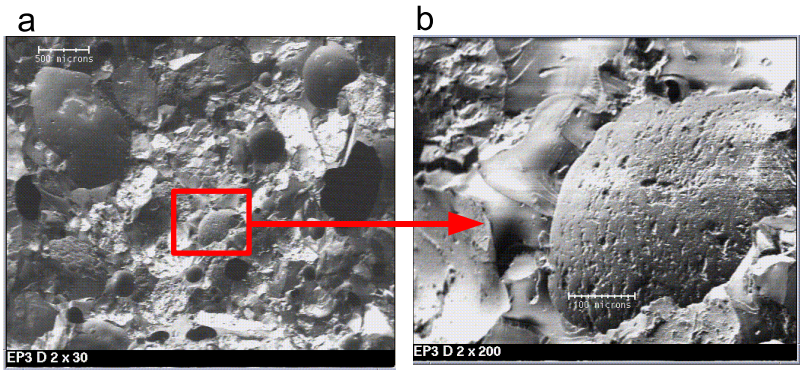


FIG. 3.34 – Micrographie électronique de la zone de rupture d'un échantillon composé de sable fin et de résine : décohésions sable/résine et fissurations de la matrice à différentes échelles : (a) 500 microns. (b) 100 microns.

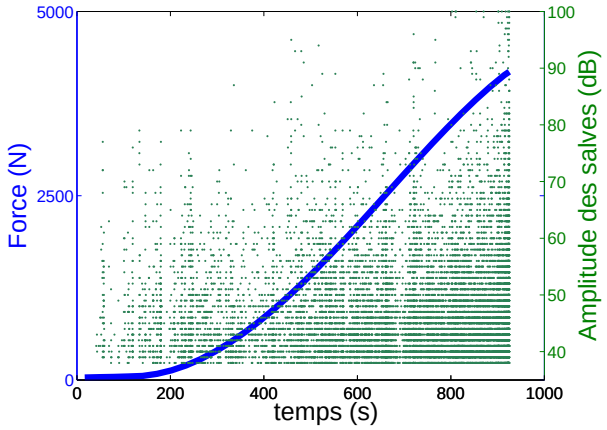


FIG. 3.35 – Force appliquée et amplitude des salves lors d'un essai de flexion quasi statique trois points sur un échantillon de béton polymère.

d'autres types d'endommagement (notamment les décohésions liées à l'interface résine/sable). La figure 3.36 présente la visualisation par ACP de ces classes obtenues par la méthode de coalescence floue. Les distributions d'amplitude de chacune des classes sont présentées en figure 3.37.

La première classe de signaux (contenant 90% de la totalité des événements d'EA) a une amplitude généralement comprise entre 38dB et 60dB pour les trois échantillons testés. Les caractéristiques de ces signaux sont identiques à celles des signaux identifiés comme de type A sur les échantillons précédemment testés et correspondant à la microfissuration matricielle. La seconde classe observée (9%) a une distribution d'amplitude comprise majoritairement entre 50dB et 90dB. Ces signaux sont identiques a ceux observés dans les échantillons de granulats/résine correspondant aux décohésions interfaciales granulats/résine (type B). La troisième classe (moins de 1% des signaux d'EA) correspond à 95-100dB d'amplitude. Ces signaux très énergétiques et apparaissant en fin d'essai ressemblent fortement à ceux observés aussi dans les échantillons de granulats/résine correspondant aux ruptures de granulats (type C). Les caractéristiques de ces salves sont très différentes des autres. Les signatures acoustiques des différents types d'endommagement observés sur les bétons polymères sont résumées dans les figures 3.41, 3.42 et

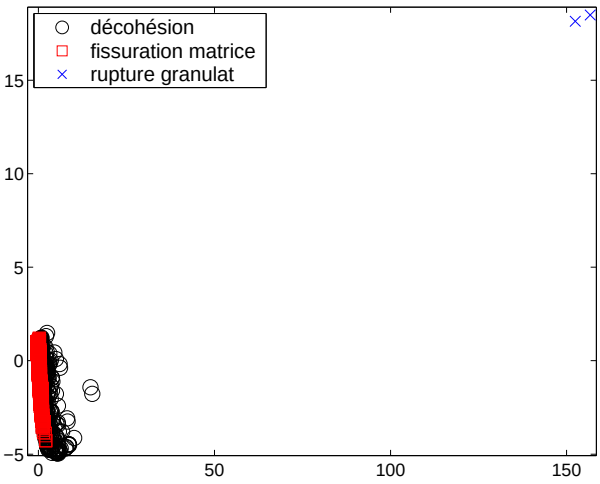


FIG. 3.36 – Visualisation par ACP des classes obtenues par la classification : échantillon de béton polymère.

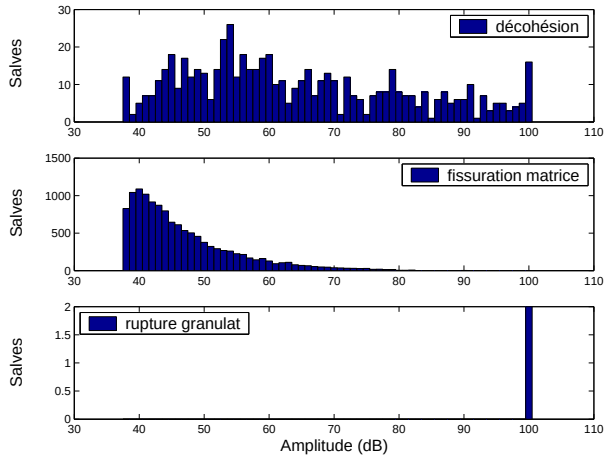


FIG. 3.37 – Distribution d'amplitude de chacune des classes obtenues par classification : échantillon de béton polymère.

3.43.

Une synthèse sur les différences de valeurs des paramètres temporels est également présentée en fonction du type d'endommagement (tableau 3.5). On peut constater que les caractéristiques des signaux liés aux différents types d'endommagement dans les bétons polymères présentent de fortes similitudes avec celles observées dans d'autres matériaux composites qui ont fait l'objet de nombreuses études tels que les composites fibre/matrice.

Les micrographies prises après rupture des échantillons sont présentées en figure 3.38 et 3.39. On peut noter que l'on observe exactement les mêmes types d'endommagement que dans les échantillons composés uniquement de granulats et de résine.

La chronologie d'apparition des différents types d'endommagement (figure 3.40) montre que les micro-

Matériaux	Type d'endommagement	Amplitude	Temps de montée	Energie	Durée
Composite	Fissuration matricielle	35-65dB	>0.01ms	$< 10^3$aJ	$\approx 0.1ms$
fibre/matrice	Décohésion interfaciale	50-80dB	<0.01ms	$> 10^4$aJ	$\approx 0.1ms$
	Rupture de fibre	75-100dB	<0.01ms	$> 10^5$aJ	$\approx 0.05ms$
Béton	Fissuration matricielle	35-60dB	>0.02ms	$< 10^3$aJ	$\approx 0.1ms$
polymère	Décohésion interfaciale	50-90dB	<0.02ms	$> 10^4$aJ	$0.2 - 0.4ms$
	Rupture de granulat	95-100dB	<0.03ms	$> 10^6$aJ	$\approx 0.1ms$

TAB. 3.5 – Synthèse des paramètres temporels calculés sur les salves d'EA (avec 1024 points échantillonnés à 1MHz) en fonction du type d'endommagement correspondant pour un composite fibre/matrice et un béton polymère.

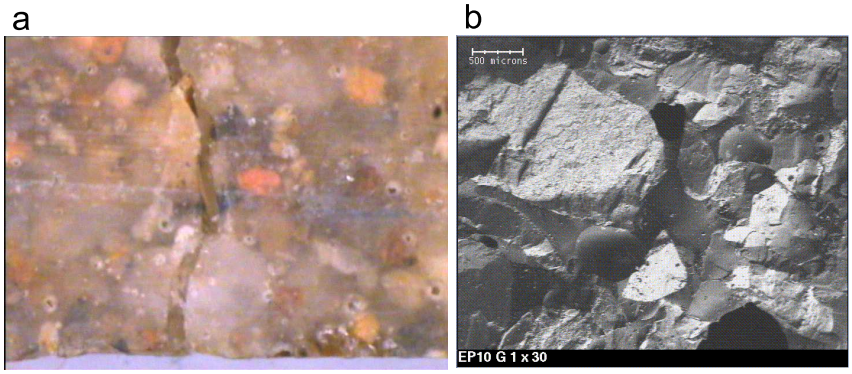


FIG. 3.38 – (a)Photographie de la zone de rupture d'un échantillon de béton polymère en vue de dessus avec les deux parties de l'éprouvette accolées. On peut voir la rupture d'un granulat en surface de l'éprouvette. (b) Micrographie de la zone de rupture d'un échantillon de béton polymère à l'échelle de 500 microns.

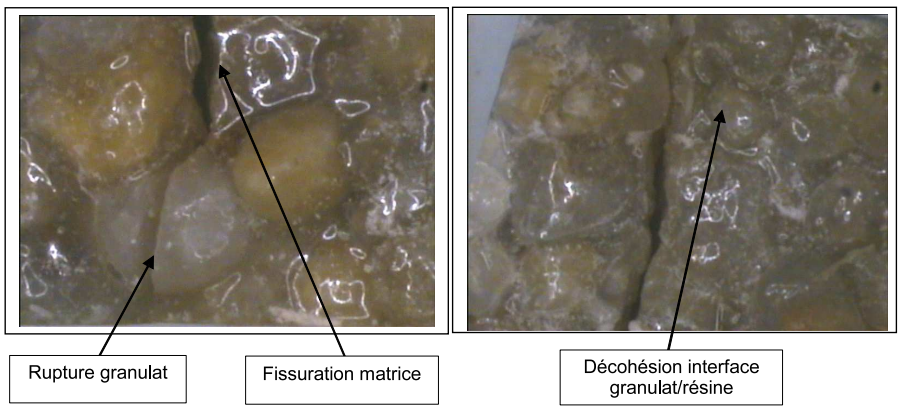


FIG. 3.39 – Photographie des trois mécanismes d'endommagement présents au niveau de la zone de rupture dans les échantillons de bétons polymères. Les deux images montrent une vue de dessus de la zone de rupture avec les deux parties de l'éprouvette accolées.

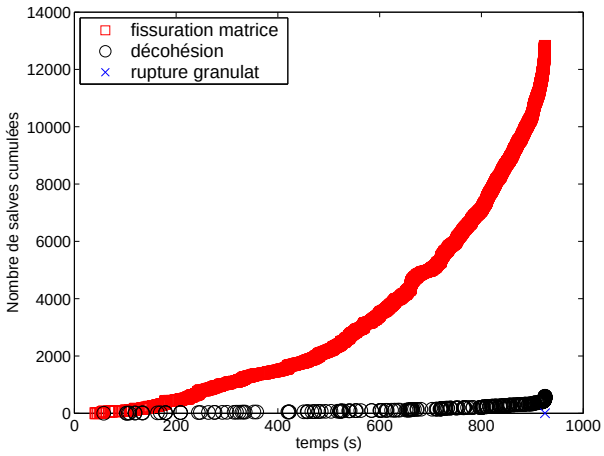


FIG. 3.40 – Chronologie d'apparition des trois types d'endommagement identifiés sur un échantillon de béton polymère.

fissurations matricielles sont les mécanismes d'endommagement les plus prépondérants durant les essais, les décohésions interfaciales qui commencent dès le début des essais sont beaucoup moins importantes que les microfissurations matricielles. En fin d'essai, quelques ruptures de granulats apparaissent et conduisent à la rupture des matériaux. Ainsi, le sable fin ne semble pas participer aux processus d'endommagement des bétons polymères. La classification et les micrographies ne permettent pas d'identifier de décohésion interfaciale sable/résine dans ces matériaux. En effet, les interfaces entre les granulats/résine étant plus importantes que celles entre le sable/résine, les granulats peuvent empêcher les décohésions de se faire entre le sable et la résine, en considérant que la concentration de nos bétons polymères en granulats est presque identique à celle en sable.

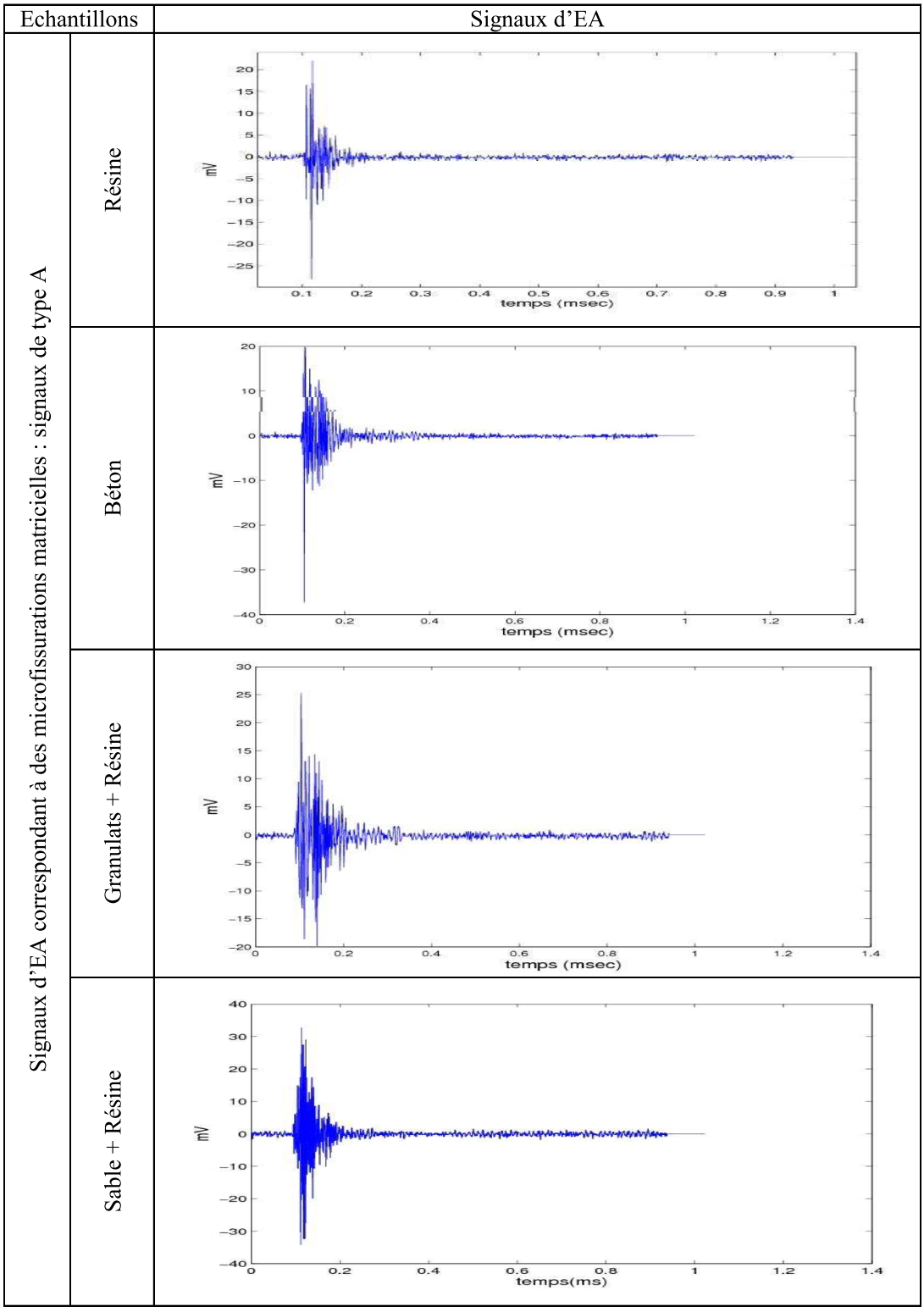


FIG. 3.41 – Signaux d'EA identifiés dans les différents échantillons correspondant aux microfissurations matricielles : signaux de type A.

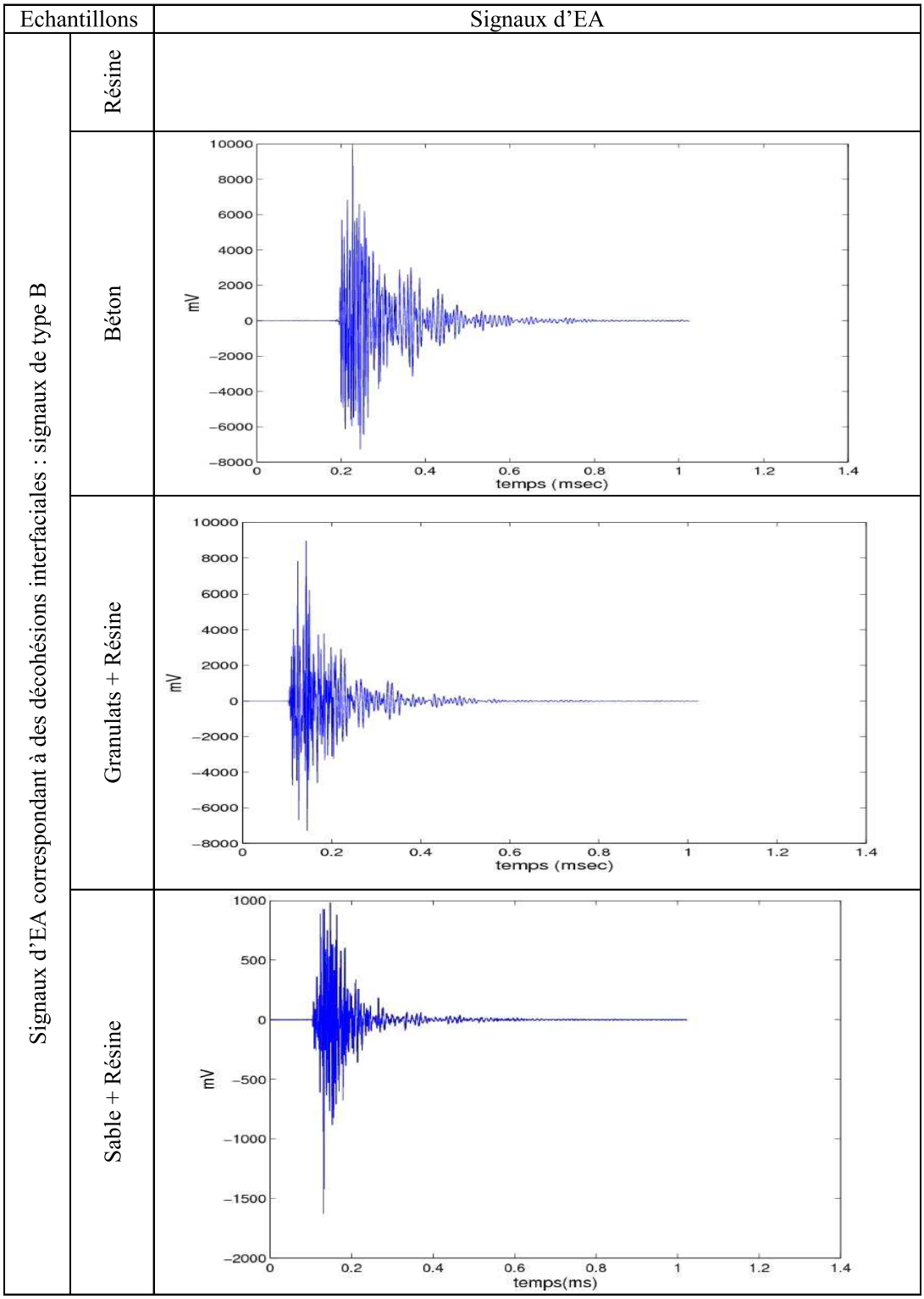


FIG. 3.42 – Signaux d'EA identifiés dans les différents échantillons correspondant aux décohésions interfaciales : signaux de type B.

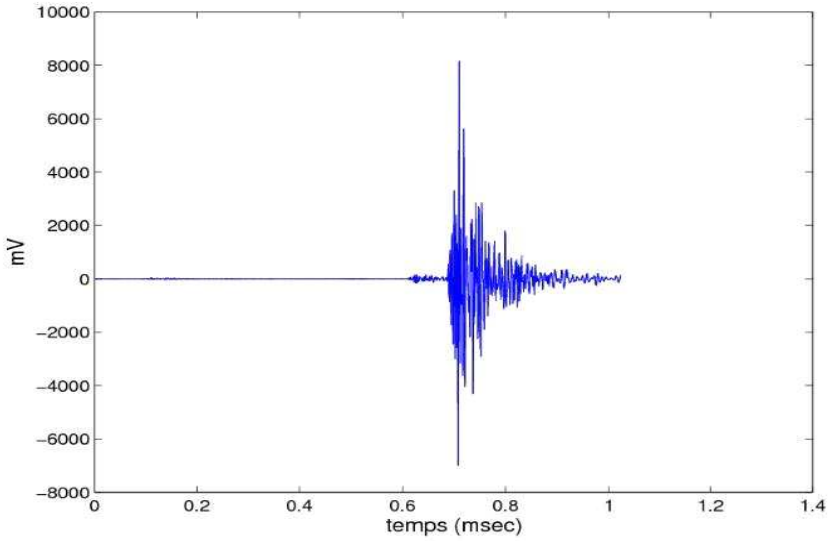
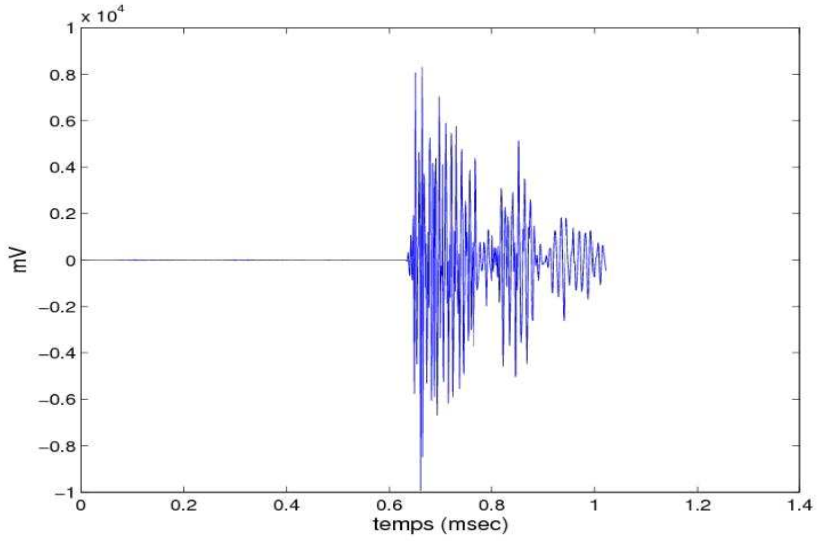
Echantillons		Signaux d'EA
Signaux d'EA correspondant à des ruptures de granulats : signaux de type C	Résine	
	Béton	
	Granulats + Résine	
	Sable + Résine	

FIG. 3.43 – Signaux d'EA identifiés dans les différents échantillons correspondant aux ruptures de granulats : signaux de type C.

3.4 Conclusion

La méthode de classification, composée de la méthode de coalescence floue et d'une ACP, est appliquée sur des matériaux composites de type fibre/matrice. Cette méthode est d'abord utilisée pour des matériaux "écoles" bien connus tels que les composites unidirectionnels afin d'être validée puis des matériaux plus complexes sont étudiés tels que des composites à plis croisés et des composites SMC. Ces matériaux sont soumis à différentes sollicitations mécaniques telles que traction simple, fluage en traction et flexion quasi statique trois points. La méthode de classification proposée permet de prendre en compte plusieurs paramètres utilisés ensemble dans une seule analyse multidimensionnelle et aucune base de données contenant des classes de signaux étiquetés en terme de mécanismes d'endommagement n'est nécessaire pour effectuer la classification (non supervisée). Cette méthode permet de discriminer les différents mécanismes d'endommagement à partir de leur signature acoustique et de suivre l'évolution de ces mécanismes dans le temps.

Un autre objectif est l'étude des matériaux hétérogènes de type béton polymère afin d'analyser leur comportement soumis à une flexion trois points en statique et d'identifier les signatures acoustiques des différents mécanismes d'endommagement de ces matériaux granulaires à base polymère intervenant lors de la mise sous contrainte mécanique. Le suivi de l'endommagement est réalisé à l'aide de l'émission acoustique pour quatre types d'échantillons de formulations différentes notamment en terme de renfort. Ils sont sollicités dans les mêmes conditions en flexion trois points sous une charge quasi statique jusqu'à la rupture. Les signaux obtenus sont classifiés par la méthode de la coalescence floue. Cette méthode permet d'identifier les signatures acoustiques émises par trois principaux modes d'endommagement : la fissuration matricielle, la décohésion interfaciale et la rupture des agrégats. L'observation de micrographies optiques et électroniques post-mortem, couplée à l'observation de l'évolution des différents mécanismes d'endommagement au sein des matériaux granulaires à base polymère durant les essais suivis par émission acoustique, semblent pouvoir justifier l'association des types de signaux identifiés par analyse statistique multivariable aux phénomènes se produisant dans les matériaux composites. Ainsi, les mécanismes les plus critiques conduisant à la rupture peuvent être identifiés et la prédiction du temps de vie restant de ces matériaux est envisageable.

Le tableau 3.6 résume les essais présentés dans ce chapitre et les principaux résultats obtenus.

Cependant, l'analyse limitée à l'étude des paramètres temporels n'est pas toujours pertinente pour caractériser les ondes acoustiques, notamment pour des composites de nature complexe où l'on peut observer des recouvrements des formes dans les projections obtenues par ACP. Ainsi, dans le but d'obtenir des informations supplémentaires sur les signaux d'EA afin de les discriminer, une méthode originale consiste à utiliser les transformées en ondelettes continues et discrètes. L'objectif est d'améliorer l'identification des différents mécanismes d'endommagement pouvant intervenir dans les matériaux composites sous charge en définissant de nouveaux descripteurs temps-fréquence ou temps-échelle pour la classification. Cette étude est présentée dans le chapitre 4 suivant.

Matériaux composites	Essais mécaniques	nombre de classes	descripteurs utilisés	modes d'endommagement identifiés	mécanismes critiques
Unidirectionnels à 45° verre/époxy	Traction	2	nombre de coups au pic nombre de coups énergie amplitude	fissuration matricielle décohésion fibre/matrice	décohésions
Plis croisés $[\pm 62°]_{12}$ verre/polyester	Fluage	3	énergie temps de montée nombre de coups amplitude durée	fissuration matricielle décohésion délaminage	délaminages
SMC	Fluage	3	énergie temps de montée nombre de coups amplitude durée	fissuration matricielle décohésion rupture de fibres	ruptures de fibres
	Flexion	3	énergie temps de montée nombre de coups amplitude durée	fissuration matricielle décohésion rupture de fibres	ruptures de fibres
Plis croisés $[90°0°]_8$ verre/époxy	Flexion	3	énergie temps de montée nombre de coups amplitude durée	fissuration matricielle décohésion délaminage	délaminages
Résine époxy	Flexion	1	énergie temps de montée nombre de coups amplitude durée	fissuration matricielle	fissurations matricielles
Granulats + Résine	Flexion	3	énergie temps de montée nombre de coups amplitude durée	fissuration matricielle décohésion résine/granulats rupture de granulats	ruptures de granulats
Sable + résine	Flexion	2	énergie temps de montée nombre de coups amplitude durée	fissuration matricielle décohésion résine/sable	décohésions résine/sable
Béton polymère	Flexion	3	énergie temps de montée nombre de coups amplitude durée	fissuration matricielle décohésion résine/granulats rupture de granulats	ruptures de granulats

TAB. 3.6 – Tableau récapitulatif des essais effectués et principaux résultats obtenus.

Chapitre 4

Etude temps-échelle des signaux d'EA issus des matériaux composites

Les outils actuellement utilisés pour l'identification des sources d'émission acoustique issus de matériaux composites sont de nature temporelle : étude à partir de paramètres temporels (nombre de coups, amplitude, etc). Cependant l'EA étant issue de déplacements locaux au sein des matériaux (création de microfissures, coalescence de fissures existantes, etc), les signaux correspondants sont souvent non stationnaires. C'est pour cela que des méthodes temps-échelle (temps-fréquence) suscitent l'intérêt des recherches actuelles.

Plusieurs transformées permettant une représentation en temps et en fréquence existent. On peut citer notamment Gabor qui introduisit la Transformée de Fourier à fenêtre Glissante (TFG) [70] en utilisant une fenêtre temporelle dans l'intégrale de Fourier. La fenêtre est translatée sur tout le domaine temporel du signal. Ainsi, la TFG donne une représentation temps-fréquence du signal. Le problème de cette représentation est l'utilisation d'une fenêtre de taille fixe couvrant le domaine temps-fréquence. Morlet et Grossmann [71] ont introduit les transformées en ondelettes qui fournissent une localisation en temps et en fréquence adaptée à la structure du signal.

Ainsi, l'originalité de notre travail consiste à appliquer l'analyse en ondelettes aux signaux d'EA afin de définir des paramètres plus pertinents contenant des informations supplémentaires que les paramètres temporels ou fréquentiels. En effet, les paramètres issus de l'analyse temporelle ou fréquentielle sont insuffisants pour l'étude de l'endommagement des matériaux complexes (plis croisés, bétons, etc).

L'objet de ce chapitre est de présenter les ondelettes que nous allons utiliser dans la suite de ce travail et de rappeler leurs propriétés fondamentales. Les transformées en ondelettes (continues et discrètes) sont ensuite appliquées aux signaux d'EA et des nouveaux descripteurs sont définis à partir de ces transformées. Enfin, ces descripteurs temps-échelle sont introduits dans la méthode de classification et les résultats obtenus pour des matériaux composites sous charge sont présentés. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus par classification avec les descripteurs temporels usuels. L'étude est d'abord appliquée à un échantillon de signaux typiques d'EA provenant de matériaux composites modèles, puis elle est présentée pour des matériaux composites à plis croisés et SMC faisant intervenir différents mécanismes d'endommagement.

4.1 Présentation de l'étude temps-échelle

4.1.1 Problématique

Les signaux d'EA que l'on étudie sont caractérisés par un comportement non stationnaire c'est-à-dire qu'il apparaît des événements transitoires que l'on ne peut prévoir. Les techniques d'étude de tels signaux font appel à l'analyse en ondelettes. Les ondelettes permettent d'obtenir une représentation des signaux dans un espace temps-échelle ou temps-fréquence (figure 4.1), où les petites échelles correspondent à des hautes fréquences et inversement les grandes échelles correspondent à des basses fréquences. Les avantages de ce mode de décomposition sont multiples. Les ondelettes forment une représentation des fonctions de $\mathbb{L}^2$ (l'ensemble des fonctions de $\mathbb{R}$ de carré intégrable) dans une base dont les fonctions sont bien localisées en temps et en fréquence. Elles conservent donc les avantages de la transformée de Fourier sans les inconvénients liés au manque de localisation : à savoir qu'une fenêtre temporelle large permet d'avoir une bonne résolution fréquentielle mais une résolution temporelle pauvre alors qu'au contraire une petite fenêtre est précise en temps mais pas en fréquence.

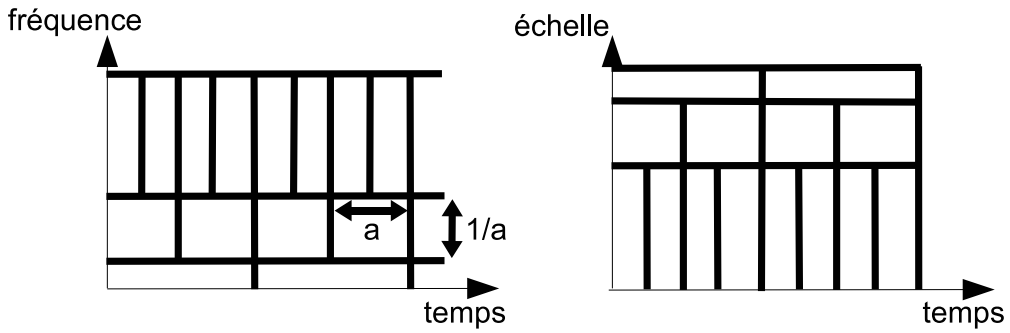


FIG. 4.1 – Pavage temps-fréquence et temps-échelle pour la transformée en ondelettes. a représente le facteur d'échelle. Les petites échelles correspondent à des hautes fréquences et inversement les grandes échelles correspondent à des basses fréquences.

L'énergie d'un signal ne change pas quand on lui applique une transformée en ondelettes. On peut donc transformer un signal en combinaison d'ondelettes, puis reconstruire le même signal à partir de ces combinaisons. De plus, cette transformation est robuste au sens où un changement de la représentation en ondelettes induit un changement de taille comparable dans le signal.

L'analyse multi-échelles repose sur la compression et la dilatation de fonctions uniques. Ces fonctions de base ont une taille de support qui va fixer la résolution temporelle σ_t et la résolution fréquentielle σ_ω de l'étude tout en satisfaisant l'inégalité d'Heisenberg :

$$\sigma_t \sigma_\omega \geq \frac{1}{2}. \tag{4.1}$$

Ainsi, sous la contrainte de l'inégalité de Heisenberg, il est possible de contrôler les résolutions temporelle et fréquentielle de l'analyse temps-échelle.

On peut aussi noter que le passage de l'espace temps-échelle à l'espace temps-fréquence est possible suivant la relation :

$$F_a = \frac{F_c}{a}, \tag{4.2}$$

avec a l'échelle, F_c la fréquence centrale de l'ondelette et F_a la pseudo-fréquence correspondant à l'échelle a.

4.1.2 Signaux d'émission acoustique étudiés

Afin de générer des signaux typiques d'EA tels que les microfissurations matricielles (appelés signaux de type A), les décohésions fibre-matrice (signaux de type B) et les ruptures de fibre (signaux de type C), des composites fibre-matrice modèles sont utilisés (voir chapitre 1 section 1.2.2). Ces matériaux sont des composites unidirectionnels verre/époxy sollicités en traction. Pour pouvoir obtenir des signaux de microfissurations matricielles, des échantillons composés uniquement de résine sont utilisés. Des échantillons de composites unidirectionnels avec une direction de chargement de 45° par rapport à la direction des fibres sont utilisés pour obtenir des signaux de décohésions fibre-matrice et de microfissurations matricielles (dans cette configuration aucune fibre n'est fracturée). Enfin, pour obtenir des signaux de rupture de fibre, des échantillons de composites unidirectionnels avec une direction de chargement de 0° par rapport à la direction des fibres sont utilisés, les ruptures de fibre étant favorisées dans cette configuration. Les signaux typiques obtenus sont présentés en figure 4.2 [3]. Ces signaux sont échantillonnés à 5MHz et

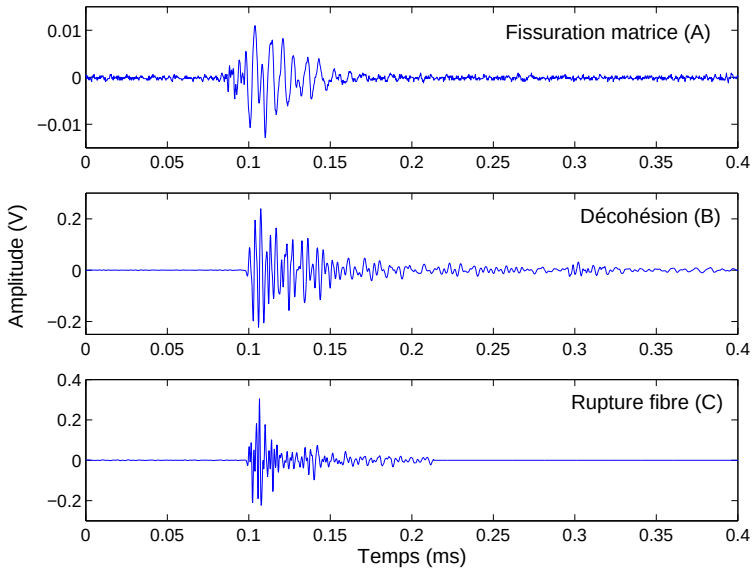


FIG. 4.2 – Exemples de signaux typiques d'EA : signal de type A représentatif d'une microfissuration matricielle, signal de type B représentatif d'une décohésion interfaciale fibre-matrice, signal de type C représentatif d'une rupture de fibre.

contiennent 2048 points. L'étude présentée dans ce chapitre est d'abord validée avec ces signaux typiques issus de matériaux composites modèles de type fibre-matrice, puis la méthode est appliquée à des matériaux plus complexes.

4.2 Transformées en ondelettes continues (TOC)

Les transformées en ondelettes continues (TOC) sont des outils très utiles pour l'analyse de signaux non stationnaires [70, 72–76]. Elles convertissent une fonction à une variable en une fonction à deux variables. La TOC d'un signal *f(t)* est définie par :

$$TOC_f(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi^*(\frac{t-b}{a})dt, \quad b \in \mathbb{Z}, \quad a > 0, \tag{4.3}$$

avec a ($a \in \Re$ et a>0) le facteur d'échelle, $\psi(t)$ l'ondelette analysante et $*$ représente le complexe conjugué. Le paramètre b ($b \in \mathbb{Z}$) est un paramètre de translation qui permet de retarder ou d'avancer l'instant d'application de l'ondelette.

La valeur de a permet de dilater ($a > 1$) ou de contracter ($a < 1$) l'ondelette analysante $\psi(t)$ et joue le rôle inverse de la fréquence (équation 4.2). Lorsque ce paramètre d'échelle a croît, l'ondelette couvre une plus grande fraction du signal permettant d'extraire le comportement à long terme du signal *f(t)*. Inversement, lorsque a diminue, la fraction du signal analysée diminue et rend possible l'étude des variations locales à hautes fréquences.

L'équation 4.3 donne les coefficients d'ondelette. Ces coefficients contiennent les informations nécessaires à une analyse multi-échelles. Le calcul des coefficients et leur comportement peuvent être représentés graphiquement (figure 4.3) [75].

L'équation 4.3 peut également être interprétée comme une projection du signal *f(t)* sur une famille de fonctions analysantes $\psi_{a,b}$ construite à partir d'une fonction mère ψ conformément à l'équation suivante :

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi(\frac{t-b}{a}). \tag{4.4}$$

Cette projection est décrite par la relation :

$$TOC_f(a,b) =< f, \psi_{a,b} >, \tag{4.5}$$

où $< >$ est le produit scalaire.

En utilisant l'identité de Parseval, on peut aussi écrire l'équation 4.5 :

$$TOC_f(a,b) = \frac{1}{2\pi} < \hat{f}, \hat{\psi}_{a,b} >, \tag{4.6}$$

où

$$\hat{\psi}_{a,b}(\omega) = \frac{a}{\sqrt{|a|}} e^{-i\omega b}\hat{\psi}(a\omega), \tag{4.7}$$

avec $\hat{f}$ et $\hat{\psi}$ les transformée de Fourier de f et ψ.

De plus, si l'ondelette ψ satisfait la condition d'admissibilité :

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\left|\hat{\psi}(\omega)\right|^2}{\omega} d\omega < \infty, \tag{4.8}$$

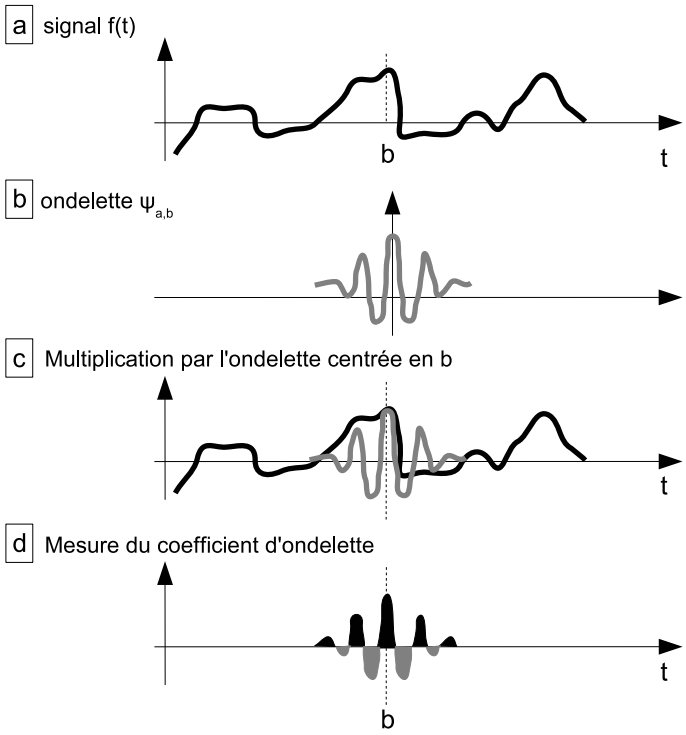


FIG. 4.3 – Modèle graphique du calcul du coefficient d'ondelette. (a) $f(t)$ est le signal à analyser. (b) $\psi_{a,b}$ est l'ondelette analysante. (c) L'ondelette est centrée sur une valeur b de l'axe des temps et le signal $f(t)$ est multiplié par les valeurs de l'ondelette analysante. (d) L'aire du signal est égale au coefficient d'ondelette correspondant à la fréquence $1/a$ et de position b. L'aire est comptée positivement pour les parties de la courbe situées au-dessus de l'axe des abscisses (noir) et négativement dans le cas opposé (gris foncé).

alors la transformée en ondelettes continues $TOC_f(a,b)$ admet un inverse :

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} TOC_f(a,b)\psi_{a,b}(t)\frac{dadb}{a^2}. \tag{4.9}$$

On peut également noter que la norme est conservée lors du changement de facteur d'échelle :

$$\|\psi_{a,b}\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{|a|} \left|\psi(\frac{t-b}{a})\right|^2 dt = \frac{1}{|a|} \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x)|^2 |a|\, dx = \|\psi\|^2 . \tag{4.10}$$

La résolution temporelle σ_t peut être estimée par les variances de la fonction analysante dans l'espace temporel : si la largeur temporelle de ψ est prise comme unité (écart type noté $\sigma = 1$) alors on peut calculer la largeur de $\psi_{a,0}$ ce qui donne :

$$\sigma_t^2 = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 |\psi_{a,0}(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} t^2 \frac{1}{|a|} \left|\psi(\frac{t}{a})\right|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} a^2 x^2 \frac{1}{|a|} |\psi(x)|^2 |a|\, dx = a^2 \int_{-\infty}^{\infty} x^2 |\psi(x)|^2 dx = a^2. \tag{4.11}$$

De même pour la résolution fréquentielle σ_ω, en calculant l'écart type pour la transformée de Fourier de $\psi_{a,0}$, notée $\hat{\psi}_{a,0}$, et en prenant comme unité l'écart-type de la transformée de Fourier de l'ondelette mère ψ, on obtient d'après l'équation 4.7 :

$$\sigma_\omega^2 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 \left|\hat{\psi}_{a,0}(\omega)\right|^2 d\omega = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \omega^2 \frac{1}{|a|}\left|a\hat{\psi}(a\omega)\right|^2 d\omega. \tag{4.12}$$

D'où finalement, en posant $x = a\omega$:

$$\sigma_\omega^2 = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{\infty} \frac{x^2}{a^2}\frac{1}{a}\left|a\hat{\psi}(x)\right|^2 \frac{dx}{a} = \frac{1}{2\pi}\frac{1}{a^2}. \tag{4.13}$$

Ainsi, comme on le voit sur la figure 4.1, le pavage élémentaire dans l'espace temps-fréquence est de surface constante, la résolution temporelle est proportionnelle à a et la résolution fréquentielle est inversement proportionnelle à a. Ces deux résolutions sont délimitées par l'inégalité d'Heisenberg (équation 4.1).

De part ses propriétés de dilatation-contraction et de translation, la transformée en ondelettes est caractérisée dans le plan temps-échelle par une fenêtre dont la largeur diminue lorsque l'on se focalise sur les structures de petite échelle (haute fréquence) ou s'élargit lorsque l'on s'intéresse au comportement à grande échelle (basse fréquence).

4.3 Transformées en ondelettes discrètes (TOD)

La transformée en ondelettes définie par l'équation 4.3 est redondante c'est-à-dire que l'on obtient plus de coefficients d'ondelettes $TOC_f(a,b)$ que nécessaire pour décrire le signal de manière exhaustive, car la base engendrée par l'ondelette est généralement non orthogonale. On peut noter que des variations des paramètres a ou b vont entraîner des variations sur les valeurs de $TOC_f(a,b)$. Pour réduire cette redondance, les valeurs de a et b sont discrétisées d'une certaine façon.

Ainsi, les transformées en ondelettes discrètes (TOD) sont définies. Elles permettent de décomposer chaque signal sur une base d'ondelettes [72–76] :

$$TOD_f(j,k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{j,k}^*(t)dt, \quad \psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2}\psi(a_0^{-j}t - kb_0), \quad j \in \mathbb{Z}, \quad k \in \mathbb{Z}, \tag{4.14}$$

avec $TOD_f(j,k)$ les coefficients des transformées en ondelettes, j représente les échelles et k le déplacement en temps, *f(t)* est le signal analysé et ψ*(t)* est l'ondelette mère. Si l'on choisit $a_0 = 2$ et $b_0 = 1$, on parle alors de transformée dyadique.

Les familles d'ondelettes discrètes ne forment que très rarement des bases. Ainsi, pour avoir un algorithme de reconstruction numérique stable de f, il faut que l'ensemble des $\psi_{j,k}$ forme une trame d'ondelettes (ou frames) [77]. Une famille d'ondelettes $\psi_{j,k}$ forme une trame d'ondelettes s'il existe deux réels A et B tels que l'inéquation suivante soit vérifiée pour toute fonction f de $\mathbb{L}^2$:

$$A\left\|f\right\|^2 \leq \sum_{j,k} |< f, \psi_{j,k} >|^2 \leq B\left\|f\right\|^2, \tag{4.15}$$

A et B sont les bornes de la trame et vérifient $0 < A \leq B < +\infty$.

Les ondelettes orthogonales sont des ondelettes discrètes particulières. Elles sont plus difficiles à construire, mais fournissent une représentation sans redondance.

4.4 Analyse multirésolution

Dans $\mathbb{L}^2$, une analyse à la résolution j d'une fonction f est obtenue par projection de f sur V_j, $j \in \mathbb{Z}$, (sous espace de $\mathbb{L}^2$) : $A_j f \in V_j$, A_j étant un projecteur sur V_j. L'analyse multirésolution [72, 75, 77] se construit en considérant les sous espaces V_j emboîtés les uns dans les autres. Le passage de V_j à V_k représente un changement d'échelle. Il existe une fonction ϕ de $\mathbb{L}^2$, appelée fonction d'échelle, qui engendre une base orthonormée de V_j par dilatation et translation. Les fonctions de base sont construites par la relation :

$$\phi_{j,k}(t) = 2^{-j/2}\phi(2^{-j}t - k), \quad j,k \in \mathbb{Z}. \tag{4.16}$$

La relation d'orthogonalité entre les fonctions de base pour une échelle donnée est :

$$< \phi_{j,k}, \phi_{j,n} >= \delta_{k,n}, \forall j,k,n \in \mathbb{Z}, \tag{4.17}$$

$\delta_{k,n}$ représente le symbole de kroeneker.

De tels espaces vérifient la propriété :

$$... \quad \subset V_2 \subset V_1 \subset V_0 \subset V_{-1} \subset ... \subset V_{j+1} \subset V_j \quad ... \tag{4.18}$$

avec :

$$\bigcup_{j\in\mathbb{Z}} V_j = \mathbb{L}^2, \bigcap_{j\in\mathbb{Z}} V_j = \{0\}. \tag{4.19}$$

Les sous espaces V_j sont appelés espaces d'approximation. On définit les espaces de détail W_j comme les compléments orthogonaux aux V_j dans V_{j-1} :

$$V_{j-1} = V_j \oplus W_j, \tag{4.20}$$

où le symbole $\oplus$ signifie somme directe. Cela signifie que l'espace W_j contient la différence d'information entre une approximation à la résolution j et une approximation à la résolution $j-1$. Les espaces de détail W_j forment une famille d'espaces orthogonaux.

Il existe alors une ondelette ψ qui par dilatation et translation engendre une base orthonormée des W_j . On note ψ cette ondelette de $\mathbb{L}^2$. Les fonctions de base seront construites selon :

$$\psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2}\psi(2^{-j}t - k), \quad j,k \in \mathbb{Z}, \tag{4.21}$$

et vérifient la relation d'orthogonalité :

$$< \psi_{j,k}, \psi_{i,n} >= \delta_{j,i}\delta_{k,n}, \forall i,j,k,n \in \mathbb{Z}. \tag{4.22}$$

L'approximation à l'échelle immédiatement plus fine peut être reconstruite en utilisant les détails du signal fournis par sa projection sur la base de W_j. La formule de reconstruction s'écrit :

$$A_{j-1}f = A_j f + D_j f, \tag{4.23}$$

avec :

$$A_j f = \sum_k a_k^j \phi_{j,k}, \quad a_k^j =< f, \phi_{j,k} >= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\phi_{j,k}^*(t)dt, \quad j,k \in \mathbb{Z}, \tag{4.24}$$

où A_j est un projecteur sur V_j et a_k^j sont les coefficients discrets d'approximation à l'échelle j de f, et avec :

$$D_j f = \sum_k d_k^j \psi_{j,k}, \quad d_k^j =< f, \psi_{j,k} >= \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{j,k}^*(t)dt, \quad j,k \in \mathbb{Z}, \tag{4.25}$$

où D_j est un projecteur sur W_j et d_k^j sont les coefficients discrets de détail à l'échelle j de f.

L'analyse multirésolution de la TOD nous permet donc de décomposer toute suite temporelle $f(t)$ en un ensemble de signaux d'approximation et de détail :

$$f(t) = \sum_j \sum_k a_k^j \phi_{j,k}(t) + \sum_j \sum_k d_k^j \psi_{j,k}(t). \tag{4.26}$$

Pour effectuer concrètement la décomposition, des algorithmes récursifs [73,75] permettent de trouver, par itérations successives, l'approximation et les détails à la résolution immédiatement inférieure. Par construction ϕ est une fonction de V_0 ; or $V_0 \subset V_{-1}$ donc ϕ peut être décomposée sur la base de V_{-1}. Il existe donc la réponse impulsionnelle d'un filtre numérique h telle que :

$$\phi(t) = \sum_k h(k)\phi_{-1,k}(t), \quad k \in \mathbb{Z}. \tag{4.27}$$

Soit pour des échelles quelconques :

$$\phi_{j,k}(t) = \sum_n h(n)\phi_{j-1,n+2k}(t). \tag{4.28}$$

Donc on peut calculer les coefficients de l'approximation à la résolution j :

$$a_k^j = \sum_l h[l-2k] < f, \phi_{j-1,l} >, \quad l = n+2k, \quad a_k^j = \sum_l h[l-2k]a_l^{j-1}. \tag{4.29}$$

De façon identique, on a par projection sur les fonctions ondelettes :

$$\psi(t) = \sum_k g(k)\phi_{-1,k}(t), \quad k \in \mathbb{Z}, \tag{4.30}$$

et les coefficients de détail sont :

$$d_k^j = \sum_l g[l-2k] < f, \phi_{j-1,l} >, \quad l = n+2k, \quad d_k^j = \sum_l g[l-2k]a_l^{j-1}. \tag{4.31}$$

Le signal étudié peut ainsi être décomposé en différentes bandes de fréquences continues qui dépendent du niveau de décomposition. Deux filtres complémentaires sont appliqués au signal *f(t)* étudié (figure 4.4).

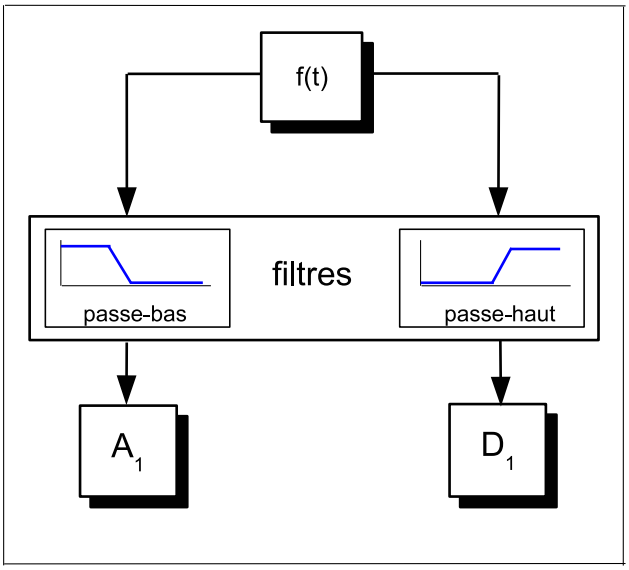


FIG. 4.4 – Décomposition du signal *f(t)* en une approximation (A_1) et un détail (D_1).

Les deux signaux obtenus après filtrage correspondent aux coefficients de l'approximation et du détail du premier niveau de décomposition.

A la décomposition suivante, les deux filtres sont appliqués aux coefficients des approximations obtenus et ainsi de suite. Les approximations représentent les échelles hautes, c'est-à-dire les composantes basses fréquences du signal $[0\ \frac{f_e}{2^{j+1}}]$. Les détails représentent les échelles basses, donc les composantes hautes fréquences du signal $[\frac{f_e}{2^{j+1}}\ \frac{f_e}{2^j}]$, f_e étant la fréquence d'échantillonnage. La somme des signaux obtenus à chaque niveau de décomposition permet de reconstruire le signal initial suivant la formule de reconstruction 4.23. Le schéma de décomposition correspondant est illustré sur la figure 4.5.

On peut noter qu'il existe une généralisation de l'analyse multirésolution appliquée aux sous espaces W_j, appelée analyse par paquets d'ondelettes. Cet algorithme conduit à une décomposition plus fine du signal en sous-bandes de fréquence. Cependant, l'analyse multirésolution représente le meilleur compromis entre rapidité de calcul et précision. En effet, c'est une technique de calcul rapide de la transformée en ondelettes discrètes. La méthode par paquets d'ondelettes a l'avantage d'être plus précise que l'analyse multirésolution mais le gain obtenu par cette précision ne justifie pas toujours la perte liée à un temps de calcul supérieur. L'analyse multirésolution est le plus souvent suffisante pour décrire le comportement non stationnaire des signaux.

4.5 Ondelettes analysantes

L'ondelette analysante doit vérifier certaines conditions :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t)dt = ... = \int_{-\infty}^{+\infty} t^m \psi(t)dt = 0, \tag{4.32}$$

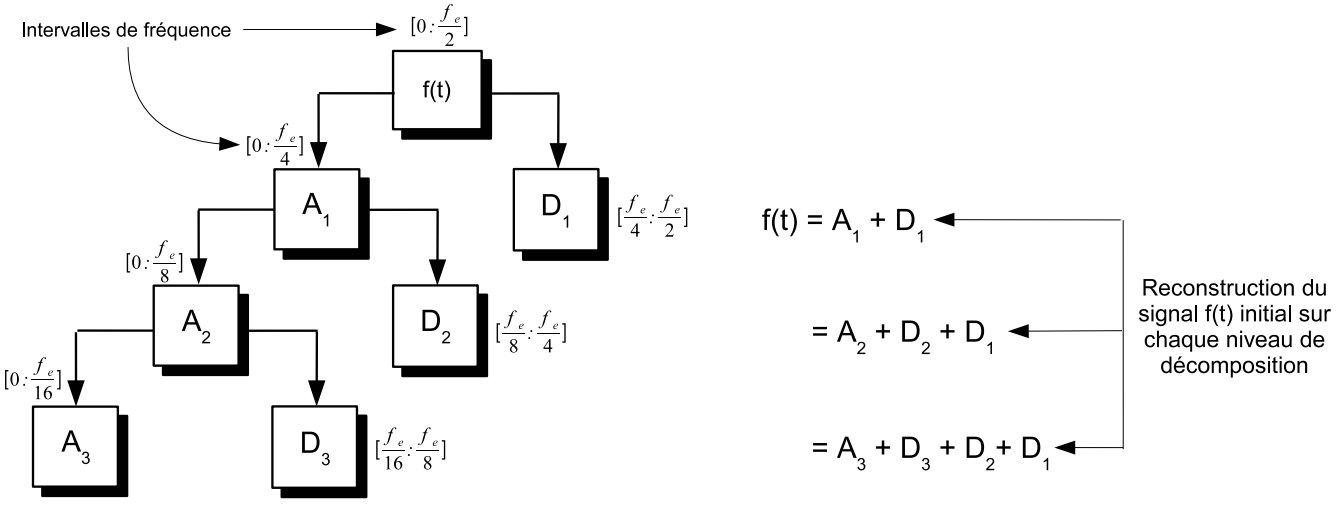


FIG. 4.5 – Décomposition du signal *f(t)* sur trois niveaux avec les intervalles de fréquences correspondants (f_e est la fréquence d'échantillonnage du signal).

c'est-à-dire que sa moyenne et ses moments d'ordre supérieurs m doivent être nuls ce qui assure à la fonction d'être oscillante.

Elle doit aussi vérifier :

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 \, dt = 1, \tag{4.33}$$

c'est-à-dire que son énergie vaille 1 afin qu'elle ait un support compact ou une décroissance suffisamment rapide quand t augmente indéfiniment pour être bien localisée dans le temps. Cette propriété assure aux oscillations de s'atténuer rapidement.

$\psi(t)$ n'est une ondelette que si elle satisfait aux deux conditions énoncées ci-dessus.

Les ondelettes peuvent avoir certaines propriétés parmi les suivantes :

- Orthogonalité : elle assure à la décomposition numérique d'être stable. Si l'analyse multirésolution est orthogonale, les opérateurs de projection dans les différents sous-espaces conduisent à des approximations optimales au sens de $\mathbb{L}^2(\Re)$.

- Support compact : si la fonction d'échelle ϕ et l'ondelette ψ sont à support compact, les réponses impulsionnelles h et g (équations 4.29 et 4.31) des filtres passe-bas et passe-haut permettant d'obtenir les coefficients d'approximation et de détail sont finies, ce qui est requis dans les implémentations. Si elles ne sont pas à support compact, une décroissance rapide est souhaitable de sorte que les filtres puissent être approchés par des filtres à réponse impulsionnelle finie. L'avantage de la compacité est l'économie en coût de calcul qu'elle procure.

– Coefficients rationnels : pour une implémentation informatique, on souhaite que les coefficients des filtres soient rationnels ou mieux dyadiques pour un coût de calcul réduit.

– Symétrie : si la fonction d'échelle et l'ondelette sont symétriques, alors les filtres sont à phase linéaire. Si l'on n'a pas cette propriété, cela entraîne une distorsion de phase lors de la reconstruction.

– Régularité : la régularité d'une ondelette est importante surtout pour des applications de compression. La compression est souvent réalisée en mettant des coefficients de détail à zéro. Si la fonction originale est une image et que l'ondelette n'est pas assez régulière, l'erreur de reconstruction sera visible. La régularité des fonctions à la décomposition est donc plus importante qu'à la reconstruction. De plus, plus de régularité implique une meilleure localisation fréquentielle des filtres.

– Nombre de moments nuls : il détermine le taux de convergence d'approximations ondelettes de fonctions régulières. Le nombre de moments nuls caractérise également la régularité de l'ondelette.

– Expression analytique : on ne dispose pas dans certains cas de l'expression analytique de ϕ ou ψ.

Différentes fonctions peuvent être utilisées comme ondelette mère, citons par exemple :

– Ondelette de Morlet [71] (figure 4.6) : c'est une gaussienne modulée par une exponentielle complexe d'expression :

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-t^2/2} e^{-i\omega_0 t}, \tag{4.34}$$

où le nombre d'oscillations reste constant et la taille de la fenêtre varie (grâce au facteur d'échelle a). Cette ondelette est régulière, symétrique, de support infini mais a une décroissance rapide. Elle peut être utilisée pour les transformées en ondelettes continues. Un des avantages de l'ondelette de Morlet est qu'elle est bien adaptée à l'analyse de signaux expérimentaux et elle est optimalement localisée dans le plan temps-fréquence (elle minimise l'inégalité de Heisenberg (équation 4.1)).

– Chapeau mexicain (figure 4.6) : cette ondelette correspond à la dérivée seconde d'une fonction gaussienne et a pour expression :

$$\psi(t) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-1/4} (1 - t^2) e^{-t^2/2}. \tag{4.35}$$

Cette ondelette est régulière, symétrique et de support infini. Elle est utilisée pour les transformées en ondelettes continues.

– Ondelettes de Daubechies [77] (figure 4.7) : ces ondelettes n'ont pas d'expression analytique. Une ondelette de Daubechies à N moments nuls vérifie l'équation de dilatation :

$$\phi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2N-1} h_{k+1} \phi(2t - k), \psi(t) = \sqrt{2} \sum_{k=0}^{2N-1} g_{k+1} \phi(2t - k), \quad g_k = (-1)^k h_{-k+1}. \tag{4.36}$$

Ces ondelettes constituent une base orthonormée de $\mathbb{L}^2(\Re)$ ayant les propriétés suivantes :

– Elles peuvent avoir N moments qui s'annulent.
– Le support de ces ondelettes est compact ($2N-1$ points).
– Leur régularité croît avec le nombre de moments s'annulant N.
– La plupart de ces ondelettes sont antisymétriques.
– Elles sont orthogonales.
– Elles peuvent être utilisées pour les transformées en ondelettes continues et discrètes.

On peut aussi noter que l'ondelette à 1 seul moment nul est en fait l'ondelette de Haar (qui vaut -1 entre -1 et 0, 1 entre 0 et 1, et 0 ailleurs).

Nous avons choisi d'utiliser les ondelettes de Daubechies avec 10 moments s'annulant comme ondelettes analysantes (ou ondelettes mères). Ces ondelettes sont choisies dans la plupart des cas car leur forme d'onde est similaire aux signaux transitoires d'EA étudiés. Cependant, les ondelettes de Daubechies n'étant pas analytiques, l'implémentation des transformées en ondelettes continues avec ces ondelettes est plus complexe.

La figure 4.6 représente le chapeau mexicain et la partie réelle de l'ondelette de Morlet. La figure 4.7 représente les ondelettes de Daubechies avec 4 et 10 moments s'annulant.

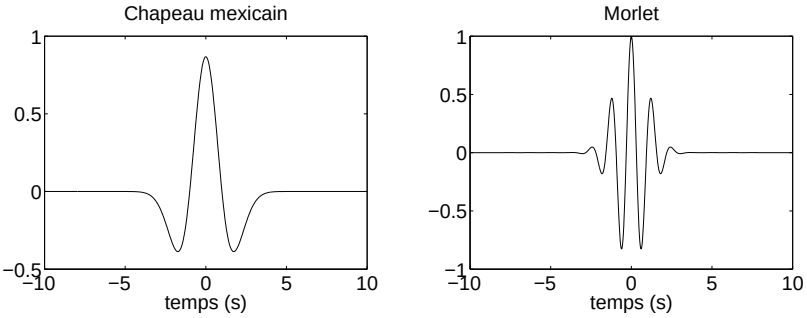


FIG. 4.6 – Chapeau mexicain et ondelette de Morlet.

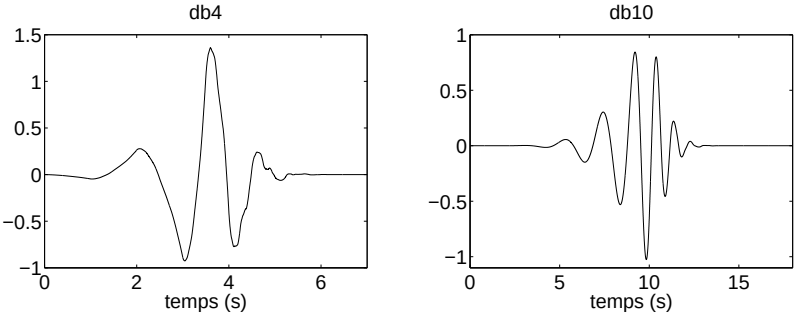


FIG. 4.7 – Ondelettes de Daubechies avec 4 et 10 moments s'annulant : db4 et db10.

4.6 Application des TOC aux signaux d'EA

Une transformée en ondelettes continues (TOC) est appliquée aux signaux typiques d'EA de type A (microfissuration matricielle), de type B (décohésion fibre-matrice) et de type C (rupture de fibre) présentés en section 4.1.2 [10,65–67]. Les transformées sont appliquées avec un paramètre d'échelle a variant de 2 à 64 par pas de 1. Les représentations temps-échelle obtenues (figure 4.8) montrent, à différentes échelles, des zones d'énergie importante correspondant aux différents mécanismes d'endommagement étudiés. De plus, les niveaux des modules des TOC dépendent de la nature du signal. Les modules maxima des TOC sont de l'ordre de 2.5×10^{-3} pour les signaux de type A, 0.55 pour les signaux de type B et 0.35 pour les signaux de type C.

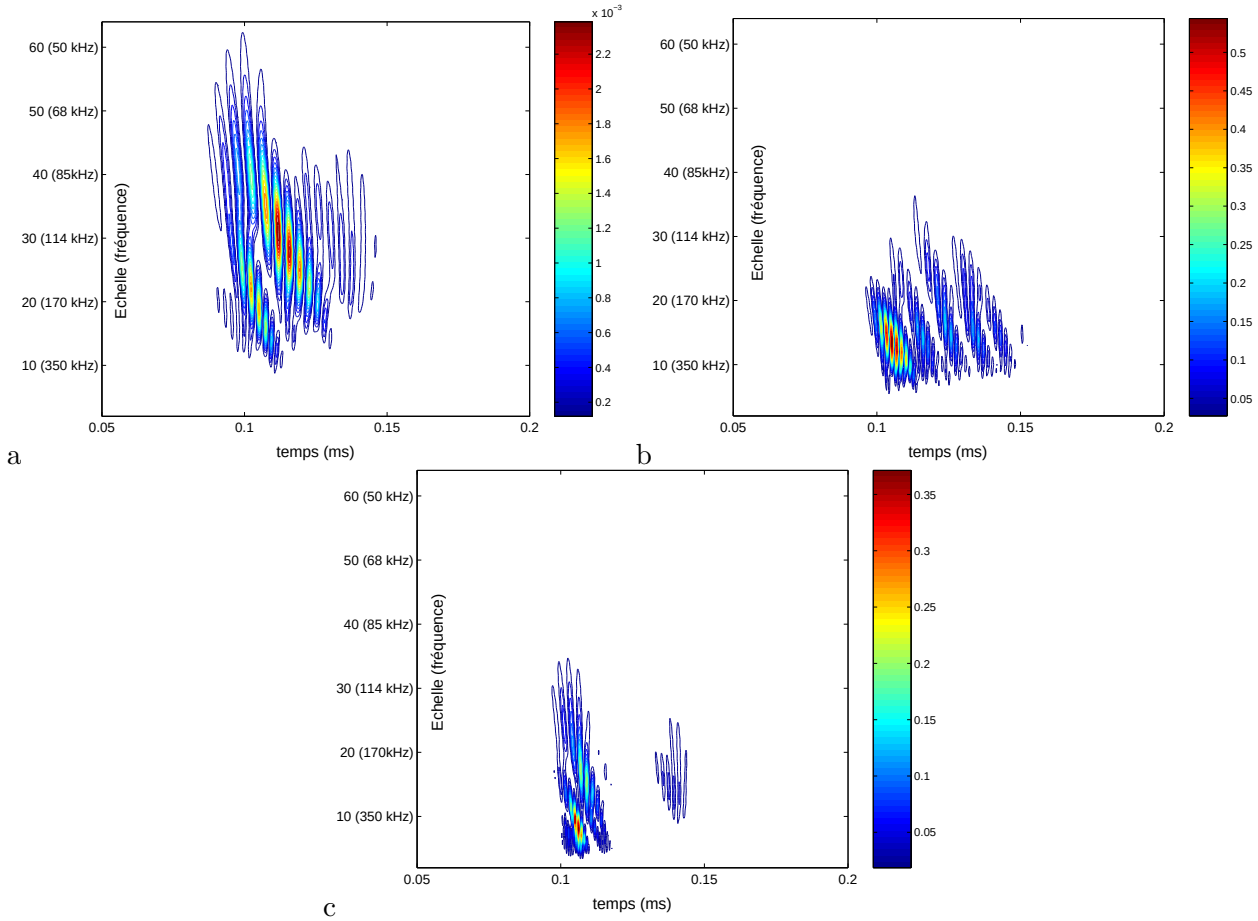


FIG. 4.8 – Représentation temps-échelle issue d'une TOC : (a) Signal de type A représentatif d'une microfissuration matricielle. (b) Signal de type B représentatif d'une décohésion fibre-matrice. (c) Signal de type C représentatif d'une rupture de fibre. Ces représentations exhibent le module des coefficients d'ondelette.

Les différentes échelles impliquées sont plus étendues pour les signaux de type A que pour ceux de type B ou C. Les signaux de type A, représentatifs des microfissurations matricielles, sont principalement compris dans des échelles allant de 20 à 50, correspondant à la zone de fréquence 68-170 kHz. Les signaux de type B, représentatifs des décohésions, se trouvent dans des échelles allant de 10 à 20, correspondant

à l'étendue fréquentielle 170-350 kHz. Les signaux de type C (rupture de fibre) font intervenir les échelles 5 à 15 correspondant à la zone fréquentielle 230-680 kHz. Les signaux de type A font intervenir des fréquences plus basses que les signaux de type B et C. Les signaux de type C sont les plus hauts en fréquence. Ces représentations temps-échelle montrent aussi que les composantes les plus énergétiques apparaissent au début des signaux de type B et C alors qu'elles apparaissent au milieu des signaux de type A. Les représentations temps-échelle mettent en avant les différences qualitatives entre les signatures acoustiques des mécanismes d'endommagement.

Il est aussi possible d'utiliser les transformées en ondelettes croisées (Cross Wavelet) [78, 79] définies par :

$$W_{XY}(a,b) = TOC_X(a,b) \times TOC_Y^*(a,b). \tag{4.37}$$

Elles permettent de mettre en évidence les ressemblances et les différences entre les représentations temps-échelle de deux signaux X et Y.

Elles sont appliquées comme exemple à des signaux typiques de microfissuration matricielle et de décohésion présentés en figure 4.2. La figure 4.9 présente les TOC croisées obtenues entre un signal de type B pris comme référence et un signal de type A puis entre deux signaux de type B et entre deux signaux de type A.

Si l'on compare la figure 4.8a (TOC d'un signal de type A) et la figure 4.9a (TOC croisée de deux signaux de type A), on peut voir que les zones de fortes énergies représentatives des signaux de type A observées par la TOC sont beaucoup plus mises en évidence par les TOC croisées. On retrouve bien évidemment les mêmes caractéristiques temps-échelle sur les deux représentations.

On retrouve ce même résultat pour la figure 4.9b (TOC croisée de deux signaux de type B) en comparaison avec la figure 4.8b (TOC d'un signal de type B).

La figure 4.9c, présentant la TOC croisée entre un signal de type A et un signal de type B, montre que les coefficients d'ondelettes sont maxima pour l'échelle 16 (214 kHz) à l'instant 0.105 ms (donc au début des salves). Si l'on compare cette TOC croisée (figure 4.9c) avec la TOC croisée entre deux signaux de type B (figure 4.9b), les deux représentations sont semblables mais les coefficients d'ondelettes sont beaucoup plus faibles en amplitude pour la TOC croisée entre un signal de type A et de type B, la différence de niveau est de l'ordre de 10^3. Enfin, si l'on compare cette figure 4.9c avec la figure 4.9a (TOC croisée de deux signaux de type A), on voit que les zones de fortes énergies sont distinctes en temps et en échelles. De plus, la différence d'amplitude des coefficients d'ondelette est de l'ordre de 10^2.

Le seul inconvénient de ces transformées est la nécessité de définir un signal de référence. Pour cette raison, elles ne seront pas retenues dans la suite de l'étude.

4.7 Définition de nouveaux descripteurs à partir des TOC

Pour obtenir une mesure objective des différences observées entre les signaux issus de sources d'endommagement différentes, des descripteurs temps-échelle sont extraits des représentations obtenues par TOC (figure 4.8) [10, 64, 67–69].

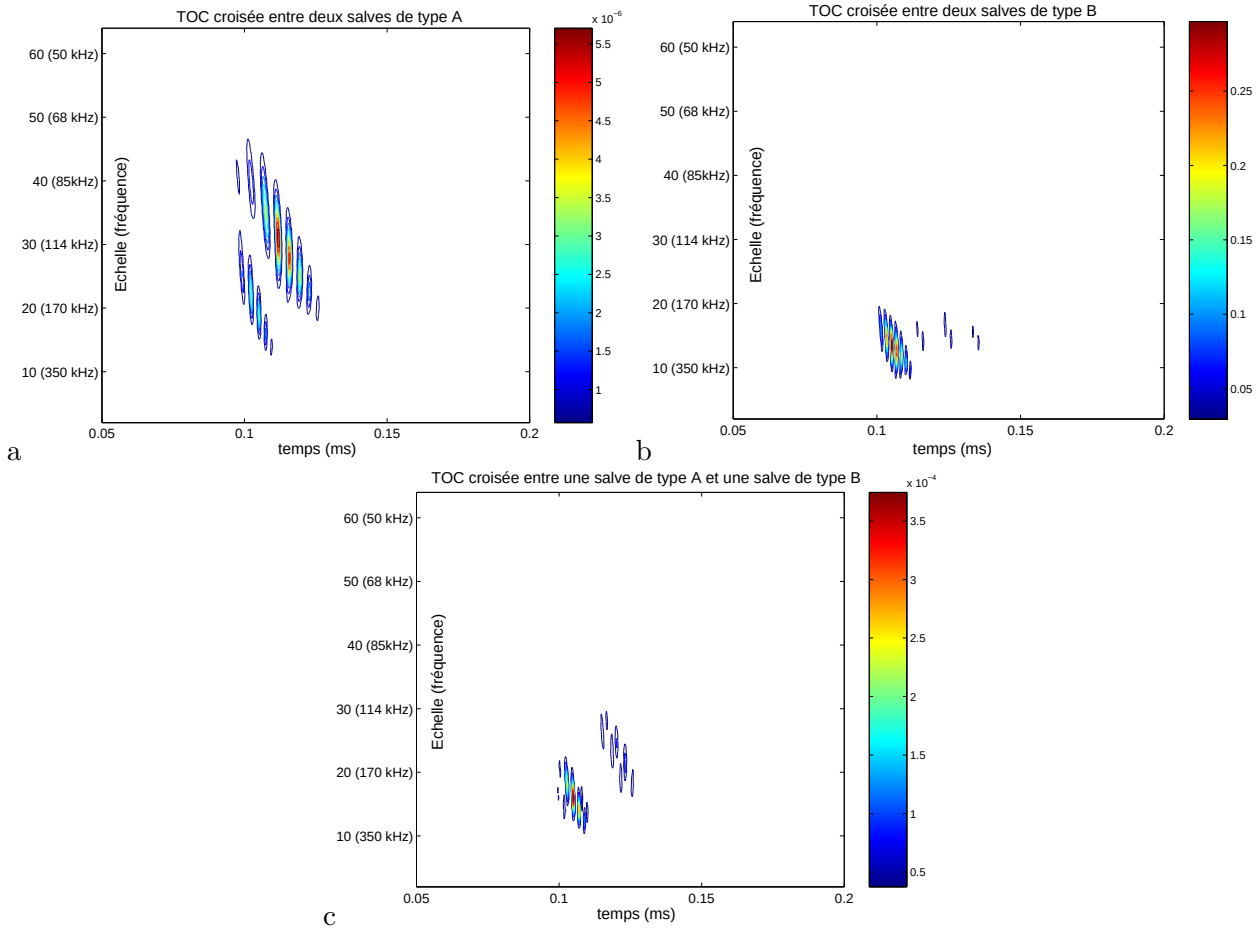


FIG. 4.9 – Transformées en ondelettes croisées : (a) entre deux signaux de type A. (b) entre deux signaux de type B. (c) entre un signal de type A et un signal de type B.

Le premier descripteur f_1 est défini comme :

$$f_1(a, I_b) = \sum_b |TOC_f(a, b)|^2, \ b \in I_b. \tag{4.38}$$

Il correspond à la somme des modules au carré des coefficients des TOC.

Le second descripteur f_2 est défini par :

$$f_2(a, I_b) = \max |TOC_f(a, b)|^2, \ b \in I_b. \tag{4.39}$$

Il représente le maximum des modules au carré des coefficients des TOC.

Ces deux descripteurs sont calculés pour chaque échelle a sur une durée de temps limitée I_b. Cette durée est définie à partir d'un seuil flottant qui correspond à un pourcentage (10%) de l'amplitude maximale des coefficients d'ondelettes. La durée effective des signaux d'EA I_b correspond au temps pendant lequel l'amplitude des coefficients d'ondelettes dépasse le seuil.

Les descripteurs correspondant aux échelles contenant les énergies les plus fortes sont sélectionnés comme nouveaux descripteurs. Par exemple, pour les signaux A (microfissurations matricielles), les signaux B (décohésions) et les signaux C (ruptures de fibre) présentés ci-dessus, les échelles considérées sont :

- a=14 (245 kHz) pour le descripteur f_1,
- a=35 (98 kHz) pour le descripteur f_2.

Un autre descripteur f_3 caractérise la localisation temporelle relative du pic d'énergie d'une salve d'EA. Il dépend de l'instant b_m correspondant au plus fort coefficient d'ondelette d'une salve d'EA tel que :

$$b_m = Arg\left(\max_{a,b} |TOC_f(a,b)|\right) \tag{4.40}$$

Cet instant est ensuite ramené à la durée effective I_b de la salve d'EA :

$$f_3(I_b) = \frac{b_m}{I_b}, \quad b_m \in I_b. \tag{4.41}$$

A noter que ces mêmes descripteurs peuvent être appliqués aux transformées en ondelettes croisées (Cross Wavelet) $W_{XY}(a,b)$.

4.8 Application des TOD aux signaux d'EA

Les ondelettes de Daubechies sont utilisées pour la décomposition sur cinq niveaux. La figure 4.10 montre la décomposition des signaux de type A (microfissuration matricielle), de type B (décohésion) et de type C (rupture de fibre) présentés en section 4.1.2 [10].

En appliquant une transformée de Fourier sur chaque niveau de détail issu de la décomposition, les bandes fréquentielles associées à chaque niveau sont mises en évidence [10, 65–67]. Les détails D5 à D1 ont des bandes de fréquences croissant jusqu'à 2.5MHz (figure 4.11).

Cette décomposition permet de trouver les fréquences les plus importantes dans un signal. Les signaux de type A, représentant les fissurations de matrice, montrent des étendues fréquentielles basses allant de 78kHz à 312kHz (détails D4 et D5). La même étude faite sur les signaux de type B, représentant les décohésions, présente plus d'informations dans les détails D3 et D4 (156kHz - 625kHz). Enfin les signaux de type C (ruptures de fibre) ont une étendue fréquentielle allant de 156kHz à 625kHz (détails D3 et D4) et semblent aussi s'étendre au niveau de D2 (donc jusqu'à 1.25MHz) d'après la figure 4.10. Ces bandes fréquentielles sont caractéristiques de chaque mécanisme d'endommagement.

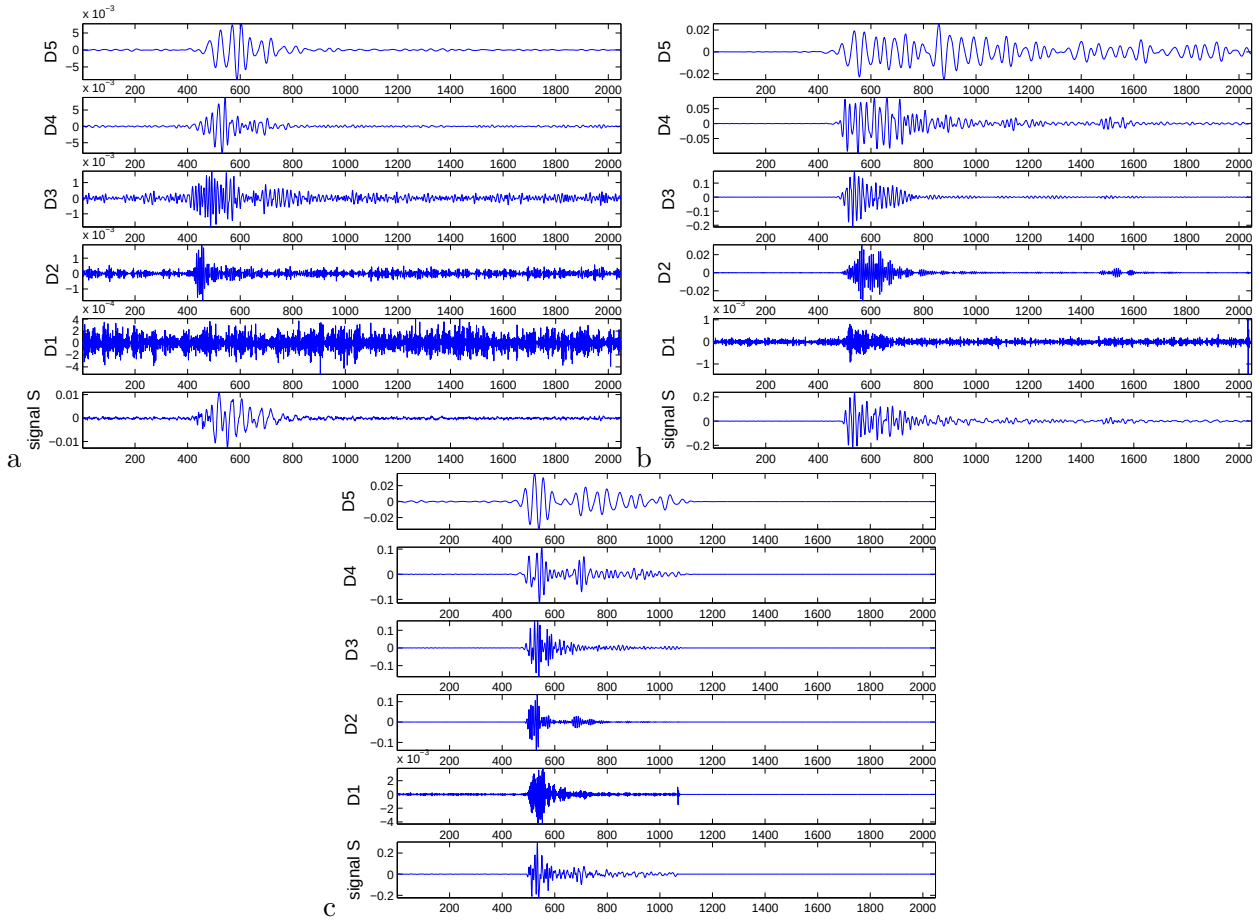


FIG. 4.10 – Décompositions obtenues par TOD sur cinq niveaux : le signal S du bas correspond au signal d'origine, les signaux notés D1 à D5 sont les détails correspondant aux différents niveaux de décomposition. (a) Signal S de type A (microfissuration matricielle). (b) Signal S de type B (décohésion). (c) Signal S de type C (rupture de fibre).

4.9 Définition de nouveaux descripteurs à partir des TOD

Les TOD peuvent aussi fournir des nouveaux descripteurs pertinents à ajouter dans l'analyse statistique multivariable [10, 64, 67–69]. Ainsi, un autre descripteur f_4 est défini :

$$f_4(j) = \max_k(\left|d_k^j\right|^2), \tag{4.42}$$

avec d_k^j les coefficients des détails de chaque niveau de décomposition j. Ce descripteur correspond au maximum des coefficients des détails au carré pour chaque niveau de décomposition. En effet, nous avons montré que les coefficients des détails prennent une valeur maximale dans des bandes de fréquences différentes pour chaque type de signal. Ainsi le descripteur f_4 sera calculé pour les niveaux de décomposition contenant les niveaux d'amplitude les plus significatifs (D3, D4 et D5).

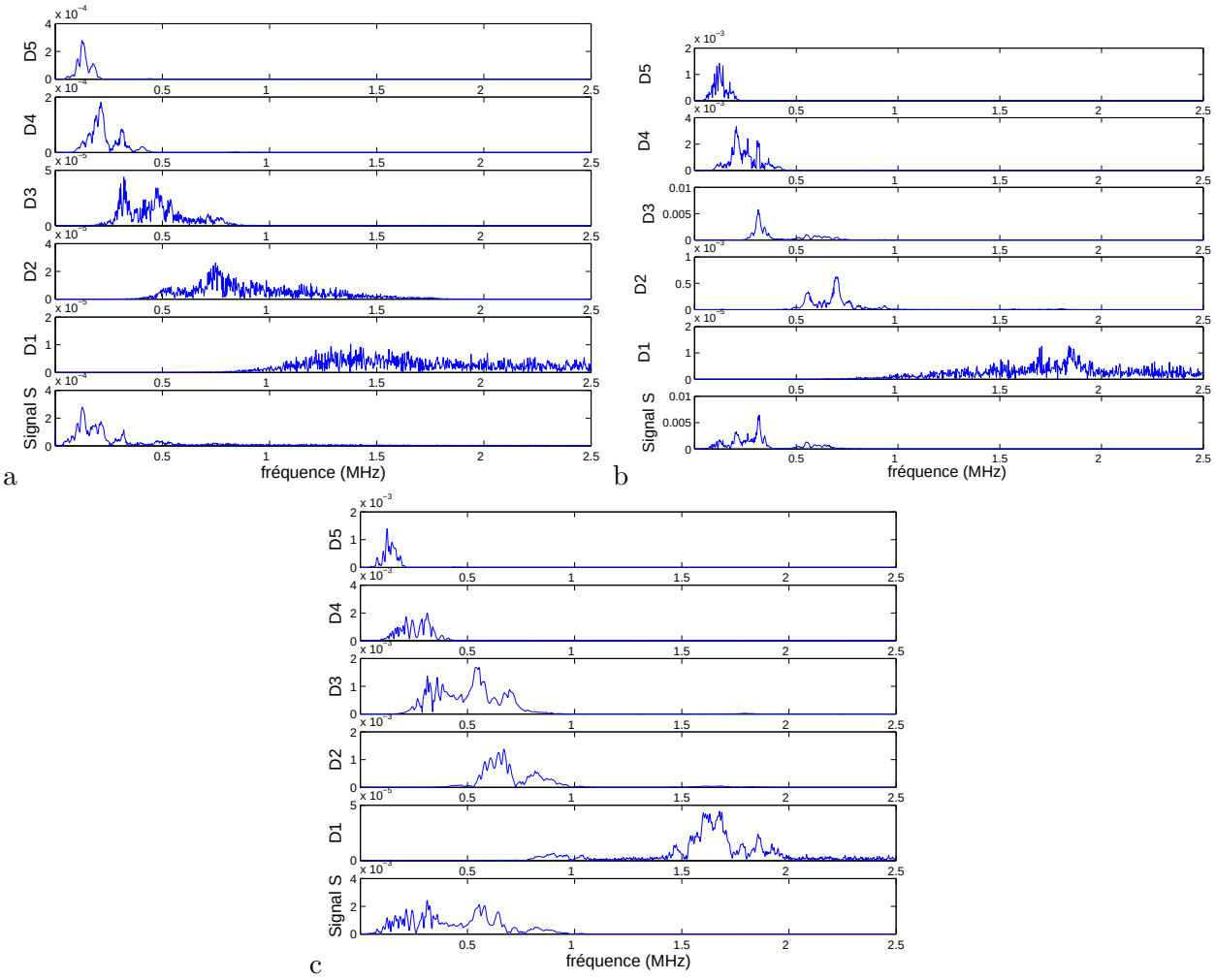


FIG. 4.11 – Module de la transformée de Fourier du signal (S) et de chaque niveau de décomposition (D1 à D5). (a) Signal S de type A (microfissuration matricielle). (b) Signal S de type B (décohésion). (c) Signal S de type C (rupture de fibre).

Un autre descripteur f_5 correspond à l'énergie de chaque niveau de décomposition :

$$f_5(j) = \frac{1}{N}\sum_{k=0}^{N-1}(d_k^j)^2, \tag{4.43}$$

avec N le nombre de points dans le signal. Ce descripteur permet de faire ressortir les détails de plus forte énergie pour chaque type de signaux. Les niveaux de décomposition contenant les énergies les plus significatives sont sélectionnés (D3, D4 et D5).

Il est aussi possible d'utiliser les corrélations pour définir un autre descripteur f_6 [80]. La méthode pour calculer ce méta-paramètre consiste tout d'abord à sélectionner un signal de référence X. Il s'agit de comparer sa décomposition d_{kX}^j à un niveau de résolution j avec celles (d_{kY}^j) obtenues par TOD des autres salves. Plusieurs niveaux de décomposition sont ensuite exploités. Des coefficients de corrélation

sont ensuite calculés entre les détails (vecteurs d^j_{kX} et d^j_{kY}) pour chaque niveau de décomposition j :

$$r^{d^j_{kX},d^j_{kY}} = \frac{C^{d^j_{kX},d^j_{kY}}}{\sqrt{Var(d^j_{kX})Var(d^j_{kY})}}, \tag{4.44}$$

où C est la covariance, Var est la variance, X est le signal de référence et Y représente les autres signaux.

Les valeurs absolues des coefficients de corrélation concernant m zones fréquentielles prépondérantes (nombre de niveaux choisi) sont sélectionnées et définissent un vecteur forme à m descripteurs :

$$f^i_6 = \left| r^{d^i_{kX},d^i_{kY}} \right|, \quad i = 1, m \tag{4.45}$$

Chaque descripteur est normalisé dans [0,1], la valeur 1 correspondant au maximum de corrélation.

A titre d'exemple, le descripteur f_6 est calculé pour les signaux de type A et B présentés en section 4.1.2 sur les trois zones fréquentielles prépondérantes (détails D3 (312-625 kHz), D4 (156-312 kHz) et D5 (78-156 kHz)). Les valeurs du vecteur forme f_6 à trois paramètres obtenu en prenant un signal B en référence et calculé par rapport à un signal de type A et un autre signal de type B sont présentées dans le tableau 4.1.

Signal B référence	Détail D3	Détail D4	Détail D5
Signal A	0.19493	0.14593	0.0013941
Signal B	0.95545	0.66873	0.46997

TAB. 4.1 – Valeurs du vecteur forme f_6 obtenu en prenant le signal B en référence et calculé pour des signaux typiques de type A et B pour les niveaux de décomposition D3 (312-625 kHz), D4 (156-312 kHz) et D5 (78-156 kHz).

Les composantes d'une forme construite à partir d'un signal de type A en référence au signal typique B montrent des valeurs faibles, indiquant une faible corrélation entre les deux types de salves. Un inconvénient de ce descripteur est la nécessité de définir un signal de référence, il n'est pas retenu dans la suite de l'étude.

4.10 Application des descripteurs temps-échelle à l'analyse statistique multivariable

Dans cette partie, nous présentons les résultats obtenus avec la méthode de classification de coalescence floue en utilisant les descripteurs issus de l'analyse temps-échelle. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus par classification avec les descripteurs temporels usuels. L'étude est d'abord appliquée à un échantillon de signaux d'EA connus comportant des signaux de type A et B, puis elle est présentée pour des matériaux composites à plis croisés et SMC faisant intervenir différents mécanismes d'endommagement.

4.10.1 Validation de la méthode sur des matériaux modèles

Un échantillon de signaux d'EA connus issus de composites verre/époxy comportant des signaux de type A (fissurations matricielles) et B (décohésions) est utilisé pour comparer les classifications obtenues en utilisant d'une part les descripteurs temps-échelle et d'autre part les descripteurs temporels usuels [10]. Cet échantillon contient 60 signaux typiques d'EA échantillonnés à 5MHz.

La méthode de classification de coalescence floue est appliquée avec les descripteurs temps-échelle : I_b, f_1, f_2, f_3 (voir section 4.7) et f_4, f_5 pour les niveaux de décomposition D3, D4, D5 (voir section 4.9). Le nombre de composantes des formes est donc de dix. Une ACP est utilisée pour visualiser les formes avant et après classification. Le résultat obtenu est présenté en figures 4.12a et b. La figure 4.12a présente l'ACP des formes constituées à partir des signaux connus de type A et B avant classification et montre que les formes ne se recouvrent pas. Ainsi, la classification des formes et la séparation des deux mécanismes d'endommagement sont facilitées comme le montre la figure 4.12b présentant l'ACP des formes obtenues après classification. L'étiquetage *a posteriori* de chacune des classes à un mécanisme d'endommagement est réalisé en comparant les caractéristiques des formes composées des descripteurs temps-échelle présentés précédemment.

Afin de comparer les résultats obtenus avec les descripteurs temps-échelle, la même étude est réalisée en prenant les descripteurs temporels usuels pour constituer les formes (amplitude, temps de montée, nombre de coups, durée). Le résultat est présenté en figures 4.12c et d. La figure 4.12c présente l'ACP des formes avant classification. Cette figure montre que la séparation des formes appartenant aux deux différentes classes n'est pas aussi évidente qu'avec les descripteurs temps-échelle. On peut voir qu'une zone frontière existe entre les deux classes où des formes appartenant aux deux différentes classes sont mélangées. La figure 4.12d représente l'ACP des formes après classification. Cette représentation montre que les formes présentes dans la zone frontière sont attribuées à la mauvaise classe. Les autres formes sont bien assignées à la bonne classe. Il y a une erreur totale de classification dans cette zone frontière de 13% avec les descripteurs temporels.

Enfin, la méthode de classification est appliquée avec les descripteurs temporels et temps-échelle sur le même échantillon de signaux typiques d'EA (soit 14 composantes pour les vecteurs forme). La projection obtenue par ACP est présentée en figure 4.13. Le résultat obtenu est très similaire à celui obtenu uniquement à partir des descripteurs temps-échelle.

4.10.2 Application aux matériaux composites à plis croisés

L'étude est menée sur un composite à plis croisés à matrice époxy renforcée par des fibres de verre contenant 8 plis orientés alternativement à 0° et 90° par rapport à l'axe de sollicitation et de dimensions : $21 \times 280 \times 2mm^3$. Ce matériau est soumis à un test de flexion quasi statique trois points (voir chapitre 3 section 3.2.3). Durant le processus de dégradation de ce type de matériaux composites sollicités en flexion, deux mécanismes d'endommagement ont été identifiés à partir de leur signature acoustique : la fissuration de la matrice (caractérisée par des signaux de type A) et la décohésion interfaciale fibres-matrice (signaux de type B). Dans cet essai, l'épaisseur du matériau étant petite, aucun délaminage n'est généré. 729 salves d'EA sont enregistrées avec un seuil d'acquisition de 42dB. La figure 4.14 présente la

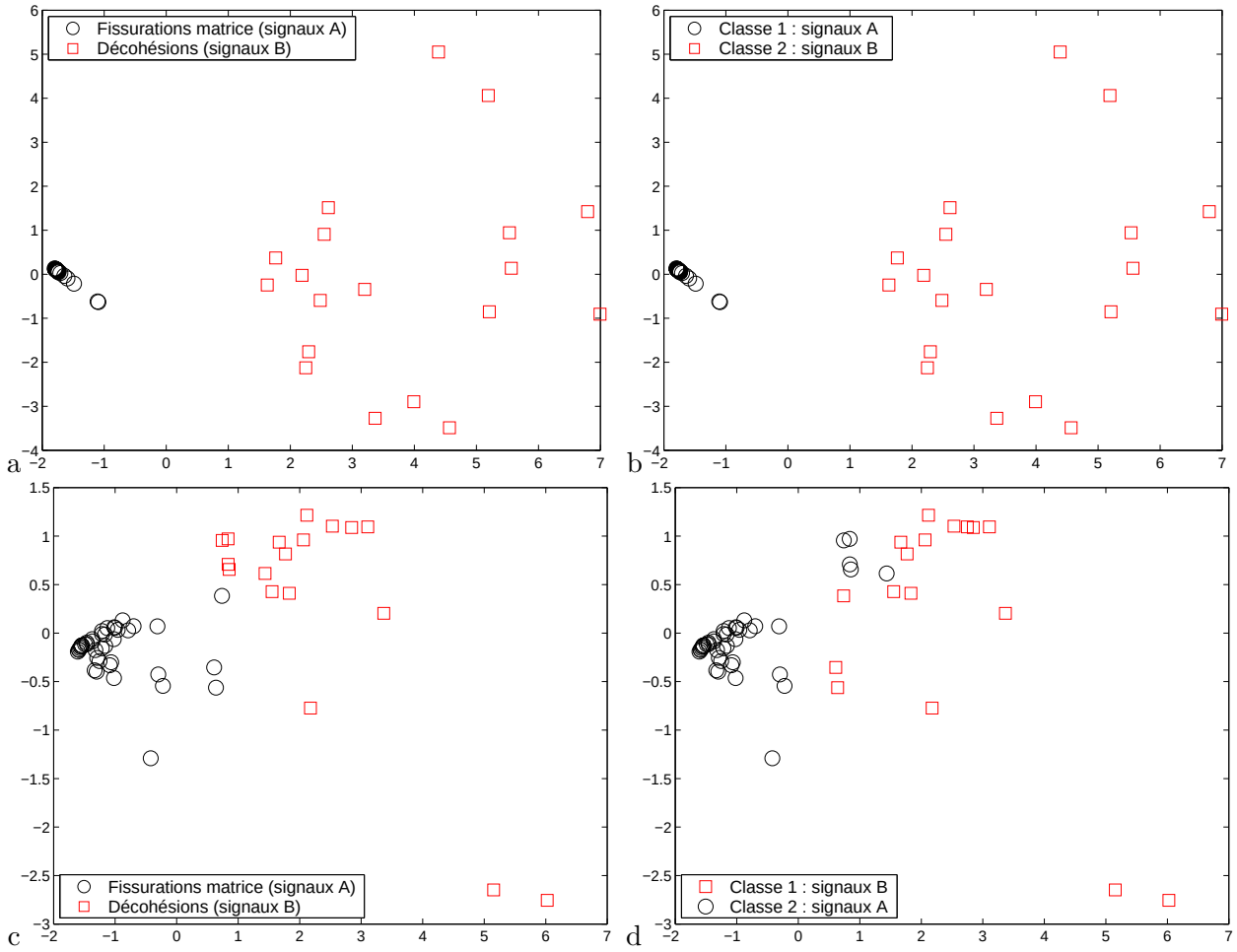


FIG. 4.12 – Utilisation des descripteurs temps-échelle : (a) Visualisation par ACP des formes (92% d'informations sauvegardées). (b) Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue (92% d'informations sauvegardées). Utilisation des descripteurs temporels : (c) Visualisation par ACP des formes (93% d'informations sauvegardées). (d) Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue (93% d'informations sauvegardées).

force appliquée durant cet essai ainsi que l'amplitude des salves d'EA enregistrées.

La classification par la méthode de la coalescence floue est tout d'abord appliquée en prenant comme composantes des vecteurs forme, les descripteurs temps-échelle présentés ci-dessus [10,64,68,69]. Une ACP est utilisée pour visualiser les formes composées de ces nouveaux descripteurs : I_b, f_1, f_2 (voir section 4.7) et f_4, f_5 pour les niveaux de décomposition D3, D4, D5 (voir section 4.9). Le résultat obtenu est présenté en figure 4.15a. Cette projection dans un plan montre que la distribution des formes ne présente pas de recouvrement et que les deux mécanismes d'endommagement sont bien identifiés.

La même étude est menée avec les descripteurs temporels avec deux classes correspondant aux deux mécanismes identifiés. Les descripteurs utilisés sont la durée, l'amplitude, l'énergie, le nombre de coups et le temps de montée des signaux d'EA. Une ACP est ensuite utilisée pour permettre la visualisation des

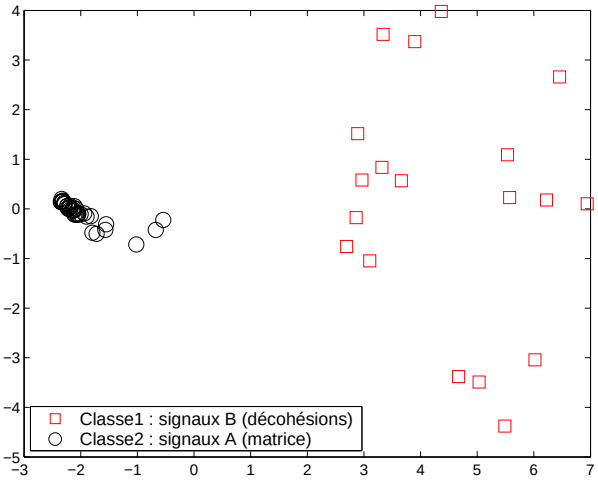


FIG. 4.13 – Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue avec les descripteurs temps-échelle et temporels (84% d'informations sauvegardées).

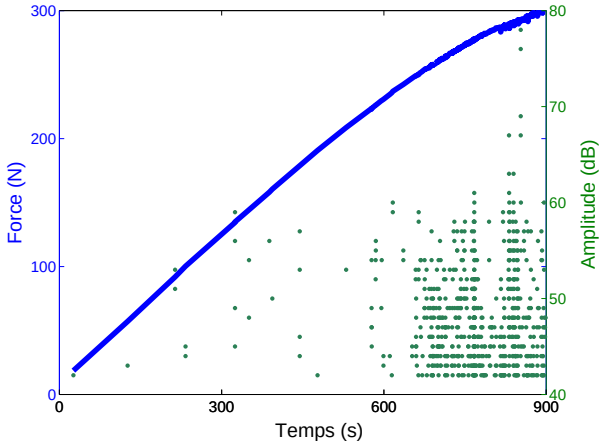


FIG. 4.14 – Force appliquée et amplitude des salves d'EA pour un composite à plis croisés sollicité en flexion quasi quasi statique trois points.

résultats de la classification dans un espace à deux dimensions (figure 4.15b). La projection des formes composées des descripteurs temporels dans cet espace montre que les deux classes d'endommagement pressenties sont bien identifiées. Cependant, la séparation entre les différentes classes n'est pas évidente dans les zones frontières. En effet, certaines formes se recouvrent et donc ne facilitent pas une classification automatique dans ces zones. De plus, les classifications présentées avec les deux types de descripteurs sont différentes : il y a une erreur de classification dans les zones frontières de 8% avec les descripteurs temporels.

La méthode de classification avec les descripteurs temps-échelle permet également de reconnaître au fil du temps les différents mécanismes d'endommagement subis par les matériaux (figure 4.16). La représentation de l'apparition des deux types de signaux pendant l'essai montre la prédominance de la microfissuration matricielle dès le début de l'essai mais également l'apparition de décohésions fibres-

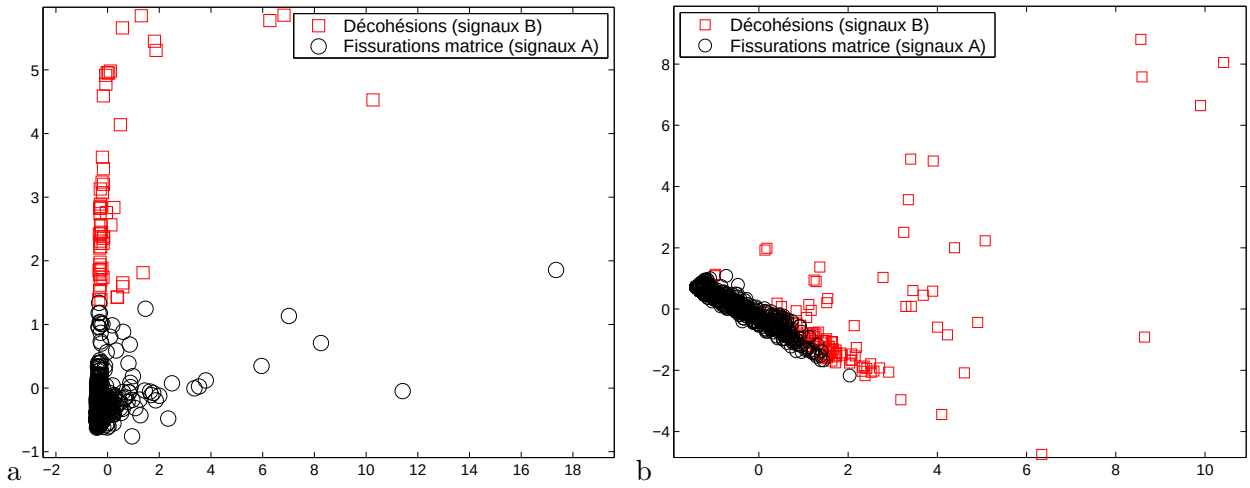


FIG. 4.15 – Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue sur un composite à plis croisés sollicité en flexion quasi statique trois points : (a) Utilisation des descripteurs temps-échelle (80% d'informations sauvegardées). (b)Utilisation des descripteurs temporels (90% d'informations sauvegardées).

matrice.

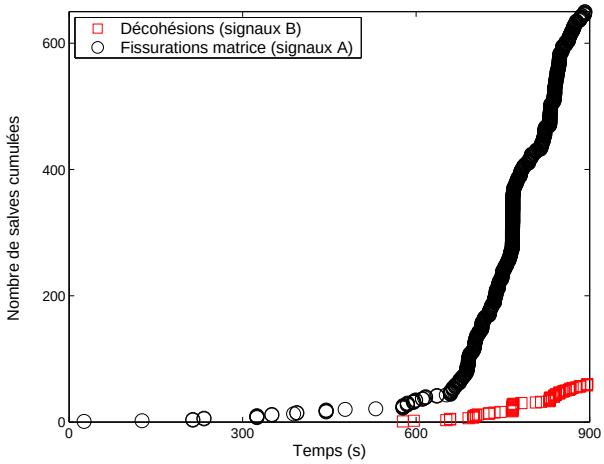


FIG. 4.16 – Composite à plis croisés sollicité en flexion quasi statique trois points : chronologie d'apparition des deux classes de signaux pendant l'essai.

4.10.3 Application aux matériaux composites SMC

L'étude est menée sur un composite SMC de dimensions : $21 \times 280 \times 2mm^3$. Ce matériau est soumis à un test de flexion quasi statique trois points (voir chapitre 3 section 3.2.3). Trois mécanismes d'endommagement ont été identifiés à partir de leur signature acoustique : les fissurations de la matrice (caractérisées par des signaux de type A), les décohésions interfaciales fibres-matrice (signaux de type B) et les ruptures de fibre (signaux de type C). 3817 salves d'EA sont enregistrées avec un seuil d'acquisition de 42dB et

une fréquence d'échantillonnage de 1MHz. La figure 4.17 présente la force appliquée durant cet essai ainsi que l'amplitude des salves d'EA enregistrées.

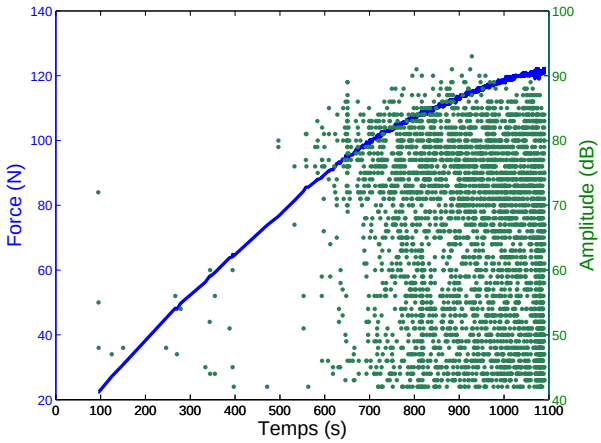


FIG. 4.17 – Force appliquée et amplitude des salves d'EA pour un composite SMC sollicité en flexion quasi statique trois points.

Les vecteurs forme sont constitués des descripteurs temps-échelle issus des TOC : I_b, f_1, f_3 (voir section 4.7). La fréquence d'échantillonnage étant trop faible, on ne peut utiliser ici les autres descripteurs. Les TOC sont calculées avec un paramètre d'échelle a variant de 1 à 8 par pas de 1 (soit de 85kHz à 685kHz). Une ACP est utilisée pour visualiser les formes obtenues avec la classification par la méthode de la coalescence floue. Le résultat obtenu est présenté en figure 4.18a. Cette projection dans un plan montre que la distribution des formes présente peu de recouvrement et que les trois mécanismes d'endommagement sont bien identifiés.

Les formes sont ensuite composées des descripteurs temporels : durée, amplitude, énergie, nombre de coups et temps de montée des signaux d'EA. La classification est menée avec trois classes. Une ACP est ensuite utilisée pour permettre la visualisation des résultats de la classification dans un espace à deux dimensions (figure 4.18b). La projection des formes composées des descripteurs temporels dans cet espace montre que les trois classes d'endommagement pressenties sont bien identifiées. Cependant, la séparation entre les différentes classes n'est pas évidente dans les zones frontières car certaines formes se recouvrent et donc ne facilitent pas une classification automatique dans ces zones.

La figure 4.19 présente l'apparition des différents mécanismes d'endommagement pendant l'essai obtenue après classification avec les descripteurs temps-échelle. On peut voir la prédominance des microfissurations matricielles dès le début de l'essai mais également l'apparition de décohésions fibres-matrice et de ruptures de fibres en fin d'essai.

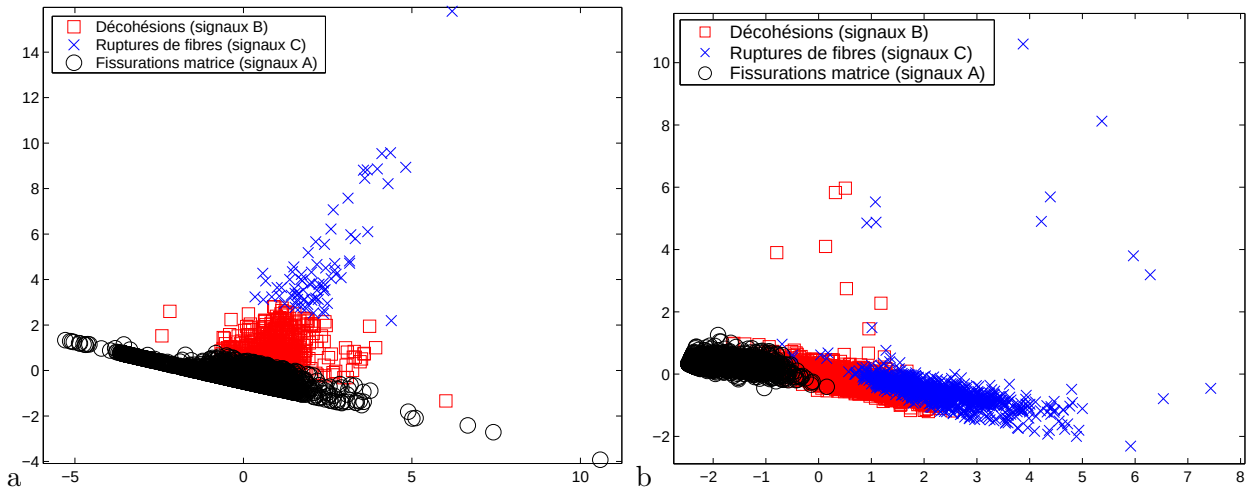


FIG. 4.18 – Visualisation par ACP de la classification obtenue par la méthode de la coalescence floue sur un composite SMC sollicité en flexion quasi statique trois points : (a) Utilisation des descripteurs temps-échelle (91% d'informations sauvegardées). (b) Utilisation des descripteurs temporels (93% d'informations sauvegardées).

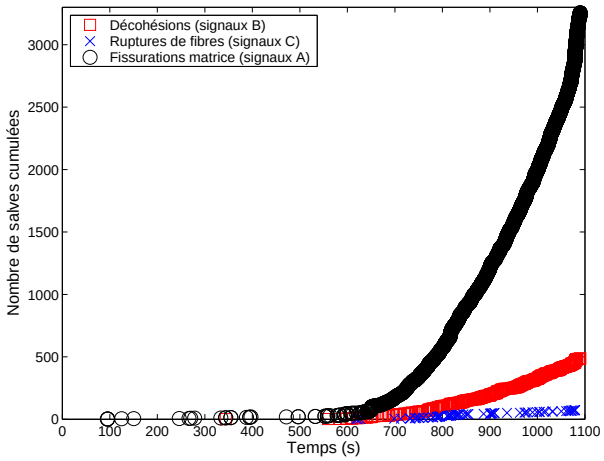


FIG. 4.19 – Composite SMC sollicité en flexion quasi statique trois points : chronologie d'apparition des trois classes de signaux pendant l'essai.

4.11 Conclusion

Les signaux d'EA issus de matériaux composites sont caractérisés par un comportement non stationnaire. C'est pourquoi l'utilisation d'outils temps-fréquence (temps-échelle) permet d'obtenir des informations supplémentaires sur ces signaux. Ce chapitre présente ainsi l'analyse en ondelettes en rappelant ses propriétés fondamentales. Nous avons plus particulièrement appliqué les transformées en ondelettes continues et discrètes aux signaux d'émission acoustique. Nous avons pu constater que ces transformées sont bien adaptées à nos signaux et qu'elles permettent de différencier des signaux typiques d'EA provenant de sources d'endommagement différentes telles que les microfissurations matricielles (signaux de type A), les décohésions interfaciales fibre-matrice (type B) et les ruptures de fibre (type C). Ainsi, des paramètres

quantitatifs sont extraits de ces transformées. Ces paramètres temps-échelle apportent des informations supplémentaires et permettent d'améliorer la classification des différents mécanismes d'endommagement. En effet, ces nouveaux descripteurs sont introduits dans la méthode de classification de coalescence floue. La visualisation par ACP des formes obtenues après classification a permis de montrer la pertinence de ces nouveaux descripteurs. L'étude a d'abord été validée sur un échantillon de signaux typiques d'EA connus comportant des signaux de type A et B, puis elle est présentée pour des matériaux composites plus complexes faisant intervenir différents mécanismes d'endommagement tels que les composites à plis croisés et les composites SMC.

Dans la perspective de quantifier l'endommagement des matériaux composites et d'identifier les différents mécanismes qui en sont responsables, les méthodes acoustiques sont intéressantes en raison de leur aspect non destructif et de leur sensibilité à l'endommagement. Ainsi, les méthodes acoustiques ultrasonores linéaires ont souvent montré leur aptitude à caractériser l'endommagement, à travers les variations de vitesse et d'atténuation d'ondes ultrasonores. Cependant, plusieurs expériences ont montré que les méthodes acoustiques linéaires ne sont pas assez sensibles au tout début du processus d'endommagement ou à l'endommagement très localisé. Souvent, les premiers mécanismes d'endommagement sont des précurseurs de la rupture finale et sont de ce fait très importants à identifier. Les méthodes acoustiques non linéaires présentent une alternative intéressante capable de détecter et éventuellement de caractériser les endommagements faibles ou précoces, localisés ou diffus. Ainsi depuis quelques années, l'acoustique non linéaire apparaît de plus en plus comme une nouvelle voie très prometteuse pour le contrôle et l'évaluation non destructive des matériaux de structure. Plus particulièrement, des phénomènes non linéaires associés à la présence d'endommagement ont été observés dans de nombreux matériaux hétérogènes par des méthodes non linéaires en résonance exploitant les phénomènes de dynamiques lente et rapide associés au comportement non linéaire hystérétique des matériaux endommagés (voir chapitre 5).

Le travail présenté dans le chapitre 5 s'inscrit dans ce cadre. Il est dédié à la caractérisation d'un composite SMC endommagé progressivement, par ondes acoustiques non linéaires en résonance et par EA. Une procédure permettant de relier l'EA au comportement en dynamique lente non linéaire (relaxation) de chaque mécanisme d'endommagement identifié dans ce matériau est proposée. Les éprouvettes endommagées sont soumises à une forte excitation (conditionnement). Un décalage de la fréquence de résonance vers les basses fréquences proportionnel au niveau d'endommagement est observé. Ce décalage ne disparaît pas immédiatement après l'arrêt de la forte excitation, mais se résorbe en fonction du logarithme du temps (relaxation), fortement lié au degré d'endommagement. L'énergie élastique libérée sous forme d'émission acoustique par chaque mode d'endommagement est suivie en fonction du niveau d'endommagement dans le matériau. D'intéressantes relations entre la vitesse de relaxation et l'énergie élastique de chaque mécanisme d'endommagement identifié dans ce matériau lors du processus d'endommagement sont obtenues et permettent de connaître la contribution des différents types d'endommagement au comportement non linéaire en dynamique lente.

Chapitre 5

Caractérisation expérimentale de dynamique lente non-linéaire et EA

L'étude présentée dans ce chapitre a pour objectif la caractérisation et le suivi de l'endommagement par ondes acoustiques non-linéaires en résonance et par émission acoustique d'un matériau composite SMC endommagé progressivement. Les matériaux hétérogènes endommagés présentent un comportement hystérétique élastique qui se traduit par des variations de leur fréquence de résonance en fonction du niveau d'excitation.

M. Bentahar a étudié ce phénomène dans une étude précédente [81]. Il a notamment effectué des mesures de dynamique lente non-linéaire sur des matériaux composites SMC endommagés qui consistent à soumettre les matériaux à un fort niveau d'excitation pendant quelques minutes (conditionnement), les fréquences de résonance vont alors se décaler vers les basses fréquences. Ce décalage ne disparaît pas immédiatement après l'arrêt de la forte excitation, mais se résorbe en fonction du logarithme du temps (relaxation). Ces mesures ont montré que les temps de relaxation et les décalages en fréquence sont proportionnels au degré d'endommagement des matériaux.

L'objectif de notre étude est de poursuivre ce travail afin de caractériser de manière non destructive l'endommagement de ce type de matériau. Des mesures d'EA sont effectuées sur un composite SMC endommagé progressivement et la méthode d'analyse statistique multivariable est utilisée pour identifier les différents mécanismes d'endommagement et pour suivre leur évolution. Plus particulièrement, l'énergie élastique libérée sous forme d'émission acoustique par chaque mode d'endommagement est suivie en fonction du niveau d'endommagement dans le matériau. L'originalité de ce travail consiste à relier cette énergie aux temps de relaxation mesurés en parallèle pour différentes étapes d'endommagement.

Ce chapitre présente tout d'abord le principe de la méthode de résonance non linéaire. Les principaux résultats obtenus par M. Bentahar sur la relaxation sont ensuite détaillés. Enfin, une procédure expérimentale permettant de relier les résultats de relaxation aux informations obtenues par EA concernant les mécanismes d'endommagement est présentée afin de connaître la contribution des différents types d'endommagement au comportement non-linéaire en dynamique lente et d'identifier les mécanismes critiques menant à la rupture finale de matériaux composites SMC.

5.1 Méthode de résonance non linéaire

5.1.1 Méthode de résonance

La méthode de résonance (figure 5.1) consiste à suivre le décalage de fréquence de résonance et la modification du facteur de qualité (voir section 5.2 équation 5.5) de "barreaux" vibrants avec l'augmentation de l'amplitude d'excitation [12, 82, 83]. Le décalage de la fréquence de résonance et la diminution du facteur de qualité sont proportionnels à l'amplitude de l'onde [84]. Ces observations ont été attribuées à une non linéarité hystérétique [85, 86].

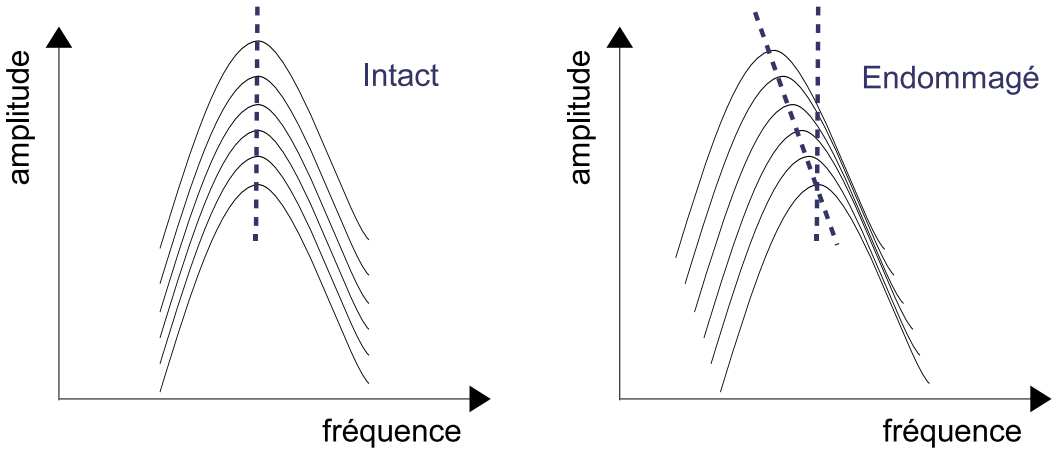


FIG. 5.1 – Représentation de l'évolution d'une résonance en fonction de l'amplitude d'excitation dans un matériau intact et un matériau endommagé. Chaque courbe correspond à une amplitude d'excitation donnée.

Le champ de contrainte de matériaux présentant un comportement hystérétique élastique s'écrit [87–89] :

$$\sigma(x) = K_0 \left[1 + \beta \frac{\partial u}{\partial x} + \delta \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + ... \right] \frac{\partial u}{\partial x} + \sigma_H, \tag{5.1}$$

avec $\frac{\partial u}{\partial x}$ le champ de déformation, K_0 le module linéaire, β et δ sont les coefficients classiques de non-linéarité quadratique et cubique. L'hystérésis (mémoire discrète) est décrite par la présence d'éléments élastiques dont le comportement est fortement lié à l'historique du matériau. Dans le cas d'un matériau unidimensionnel (un cylindre de roche par exemple), le champ de contrainte de ces éléments σ_H est décrit par un terme supplémentaire :

$$\sigma_H = K_0 \, \alpha \left(\Delta\epsilon \pm \frac{\partial u}{\partial x} \right) \frac{\partial u}{\partial x}, \tag{5.2}$$

avec $\Delta\epsilon$ la déformation maximale, α le paramètre d'hystérésis, le signe $\pm$ correspond au module lorsque la déformation croît ou décroît. On peut montrer à partir de l'équation 5.1 que lorsque la déformation appliquée est importante, c'est-à-dire que le matériau s'endommage et que son comportement ne devient plus élastique non-linéaire classique, le paramètre d'hystérésis α domine le comportement non-linéaire [89, 90] :

$$\frac{\Delta f}{f_0} \approx \alpha \frac{\partial u}{\partial x}, \tag{5.3}$$

où Δf est le décalage de la fréquence de résonance et f_0 est la fréquence de résonance à faible amplitude d'excitation. La figure 5.2 présente le décalage fréquentiel (équations 5.3 et 5.4) en fonction de la déformation appliquée à un matériau présentant un comportement hystérétique élastique [89, 90].

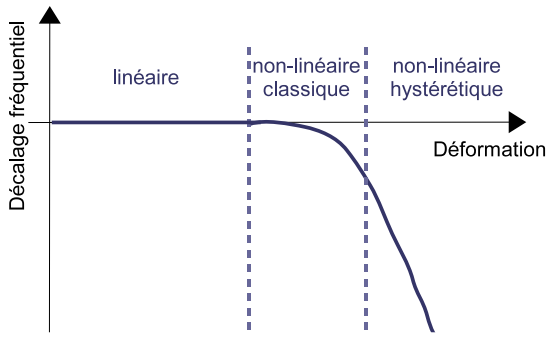


FIG. 5.2 – Représentation du décalage en fréquence en fonction de la déformation appliquée.

5.1.2 Dynamique rapide

L'évolution d'un ou de plusieurs modes de résonance en fonction du niveau d'excitation dépend de l'état d'endommagement dans lequel se trouve le matériau étudié. La non linéarité hystérétique augmente lorsqu'un matériau hétérogène initialement intact est endommagé [91]. Pour un matériau homogène à l'état sain, l'augmentation du niveau d'excitation n'influe pas ou peu sur la valeur des fréquences de résonance suivies. Pour un matériau hétérogène à l'état endommagé, l'augmentation du niveau d'excitation va s'accompagner d'une perte de rigidité dans le matériau et les fréquences de résonance se décalent vers les basses fréquences. De plus, le facteur de qualité (voir section 5.2 équation 5.5) des courbes de résonance diminue pour des amplitudes d'excitation élevées (figure 5.1). Ce processus est appelé dynamique rapide et est observable pour des endommagements diffus et localisés et de faible niveau [92].

5.1.3 Dynamique lente

Lors de mesures de résonance non linéaire, l'excitation peut être réalisée avec un pot vibrant (ou un capteur piézoélectrique), les courbes de résonance (fonctions de transfert) sont relevées à partir d'un accéléromètre muni d'un conditionneur (ou d'un vibromètre laser) relié à un analyseur.

Le processus de dynamique lente [92,93] intervient lorsque le matériau est excité à fort niveau de façon continue autour d'un de ses modes propres de vibration. Durant cette étape, dite de conditionnement, il a été vérifié que le seul paramètre capable d'influencer le module et le facteur de qualité des courbes de résonance est l'amplitude du signal d'excitation. Cela veut dire que le conditionnement reste indépendant de la façon dont le matériau est conditionné : c'est-à-dire soit balayer la fréquence autour du mode étudié soit exciter à fréquence constante [81].

Lorsque les matériaux non-linéaires hystérétiques sont soumis à un conditionnement, le module et le facteur de qualité décroissent instantanément et continuent leur décroissance jusqu'à atteindre un nouvel état d'équilibre dans lequel aucun changement n'est observé. Les courbes de résonance en dynamique lente

obtenues sur un composite SMC endommagé (sollicité autour de son sixième mode de flexion) sont présentées sur la figure 5.3. Ces courbes montrent l'influence du niveau d'excitation sur la fréquence et le module. La fréquence de résonance et le module tendent vers une valeur limite qui dépend du niveau d'excitation ainsi que de l'état de santé du matériau. Ce comportement non-linéaire élastique hystérétique est généralement dû aux inhomogénéités dans les matériaux telles que les interfaces fibres-matrice, les microfissures, etc.

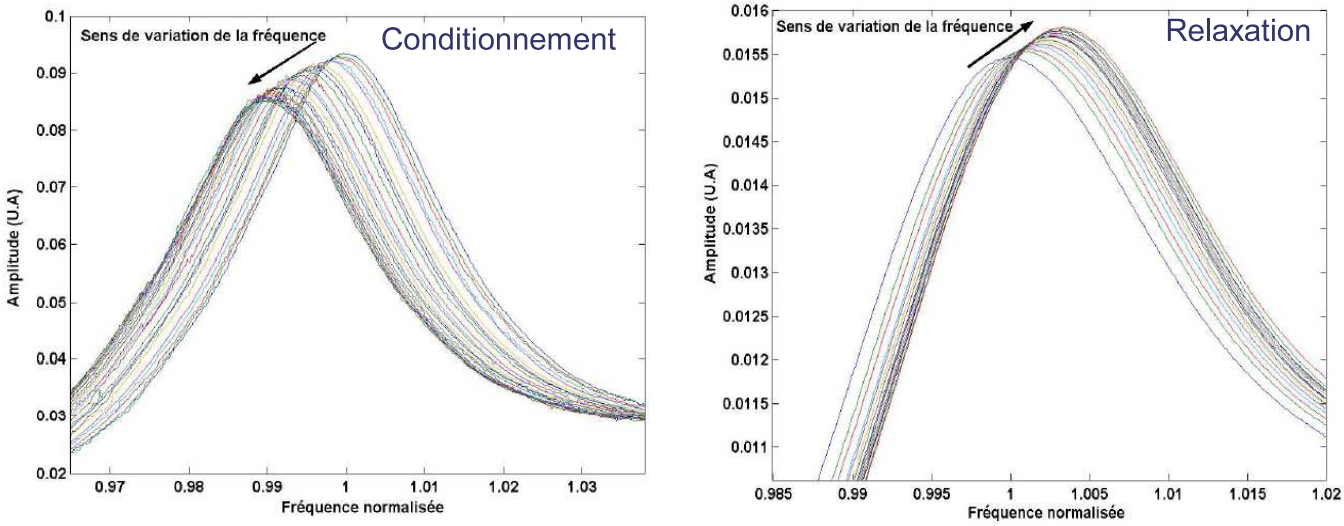


FIG. 5.3 – Evolution des courbes de résonance correspondant au sixième mode de flexion pendant le conditionnement et la relaxation d'un composite SMC endommagé [81]. U.A. correspond à Unité Arbitraire.

Une étape de relaxation peut aussi être observée [92–94]. Il suffit d'arrêter la forte excitation (conditionnement) lorsque la valeur limite de la fréquence de résonance est atteinte et de la remplacer par une onde sinusoïdale de faible niveau. Son rôle est de sonder les changements qui ont lieu dans le matériau sans influer la relaxation. Le matériau se relaxe alors et retourne progressivement vers un nouvel état d'équilibre proche en amplitude et en fréquence de résonance de l'état avant conditionnement. Le retour à l'état d'équilibre est d'autant plus lent que le matériau est endommagé (micro-fissuré) et il peut être observé en suivant les variations de fréquence de résonance et de temps de relaxation avec le temps. M. Bentahar et R. El Guerjouma ont expérimentalement prouvé que le temps de relaxation dans un composite SMC augmente avec l'endommagement et qu'il peut être utilisé pour suivre l'état de santé des matériaux hétérogènes [95].

Ces comportements non-linéaires hystérétiques sensibles aux hétérogénéités et plus particulièrement à l'endommagement ont été observés dans de nombreux matériaux : roches, bétons, métaux, verre, composites, etc [13, 92, 96, 97]. Cependant, une meilleure compréhension des mécanismes à l'origine des comportements non-linéaires hystérétiques observés expérimentalement permettra de développer les approches théoriques liées à ces phénomènes.

5.2 Paramètres non-linéaires

Afin de suivre le degré d'endommagement, des indicateurs non-linéaires sont choisis. Nous nous intéressons plus particulièrement au décalage de la fréquence de résonance et au temps de relaxation. Lorsque la méthode de résonance est appliquée à un matériau hétérogène endommagé, les fréquences de résonance peuvent se décaler et traduisent un comportement non-linéaire hystérétique.

Le décalage fréquentiel est défini comme le décalage de la fréquence de résonance Δf pour une amplitude donnée par rapport à la fréquence de résonance f_0 à faible amplitude d'excitation, f étant la nouvelle fréquence de résonance observée.

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0}. \tag{5.4}$$

Il est un indicateur intéressant du degré d'endommagement pour le contrôle des matériaux.

Le deuxième paramètre est le suivi du temps de relaxation, plus précisément l'inverse du temps de relaxation qui traduit la vitesse de relaxation du matériau étudié à l'état intact ou endommagé.

On peut aussi suivre les variations du facteur de qualité Q de chaque résonance qui correspond au rapport :

$$Q = \frac{f_0}{f^+_{-3dB} - f^-_{-3dB}}, \tag{5.5}$$

avec la fréquence de résonance f_0 et les fréquences de coupure à -3dB haute (f^+_{-3dB}) et basse (f^-_{-3dB}). Le facteur de qualité permet de qualifier les résonances. Pour des amplitudes d'excitation élevées, le facteur de qualité diminue avec l'augmentation de l'amplitude d'excitation.

5.3 Procédure expérimentale

Les matériaux étudiés dans ce chapitre sont des composites base polymère à fibre de verre de type SMC (sheet molding compound) (voir chapitre 1 section 1.1). Les éprouvettes étudiées de formes parallélépipédiques ont pour dimensions : $100 \times 20 \times 3mm^3$. Elles sont endommagées progressivement par des essais de flexion quasi statique trois points avec une vitesse de déplacement de 0.04 mm/min (voir chapitre 1 section 1.1.2).

Quatre étapes d'endommagement croissant allant de 0.4 mm à 1.6 mm de déplacement sont sélectionnées à partir d'un essai préliminaire allant jusqu'à la rupture d'un échantillon (voir tableau 5.1).

Etape d'endommagement	d1	d2	d3	d4
Déplacement (mm)	0.4	0.8	1.2	1.6
Force (kN)	0.15	0.28	0.35	0.38

TAB. 5.1 – Force et déplacement appliqués pour chaque étape d'endommagement.

Pour les états intacts et endommagés, le composite SMC est tout d'abord excité autour de son 6ème mode propre de flexion (f_r=16.685 kHz) avec un niveau d'excitation assez faible pour vérifier que le

matériau est complètement relaxé (c'est-à-dire que la fréquence de résonance ne varie pas dans le temps avec des balayages des fréquences autour de f_r). L'excitation est réalisée avec un pot vibrant, les courbes de résonance sont relevées à partir d'un accéléromètre muni d'un conditionneur relié à un analyseur. Ensuite, le matériau étudié est conditionné pendant deux minutes autour de f_r. Une fois le conditionnement effectué, la relaxation du composite SMC est suivie avec le même niveau de très faible amplitude.

Le mode opératoire pour le suivi du temps de relaxation a été réalisé par M. Bentahar dans une précédente étude [81] dont nous rappelons ici les principaux points [98].

Le choix d'étude du 6ème mode propre de flexion vient d'une limitation du dispositif expérimental à détecter les premiers modes de vibrations. Cela est lié à l'amplificateur dont la gamme de fréquence est comprise entre 10 kHz et 200 MHz. Le premier mode correctement amplifié correspond au 6ème mode propre de flexion de fréquence f_r=16.685 kHz [81]. Ce mode de résonance est utilisé pour suivre l'évolution de l'endommagement dans l'étude proposée.

La sensibilité de la méthode de résonance acoustique non-linéaire à l'endommagement du SMC a été vérifiée en créant un endommagement léger et localisé en flexion trois points. L'évolution du 6ème mode propre de flexion a été suivie avant et après endommagement en fonction du niveau d'excitation. Des courbes de résonance du même type que celle présentée en figure 5.1 ont été obtenues [81] où l'on peut voir que le comportement en résonance change en fonction du niveau de sollicitation lorsque le matériau est endommagé.

A noter aussi que nous nous sommes focalisés sur un seul mode dans cette étude mais qu'une étude plus large du spectre a été réalisée précédemment [81] dans laquelle il a été montré que les autres modes de résonances sont aussi affectés par l'endommagement et réagissent de la même manière que le mode suivi.

Enfin la linéarité du dispositif expérimental a aussi été vérifiée dans cette précédente étude [81] sur un matériau en aluminium dont le comportement est considéré comme linéaire par rapport au matériau SMC. La limite de linéarité de la chaîne de mesure a ainsi pu être établie.

Ainsi, le bon niveau d'amplification de ce mode de résonance nous permet donc de suivre l'évolution de l'endommagement au sein du matériau. On peut détecter les premiers stades d'endommagement et suivre le comportement du matériau en vibration pour des endommagements croissants allant jusqu'à l'apparition de macro-fissures en surface du matériau.

En parallèle, les ondes ultrasoniques générées par les microfissures lors de l'endommagement du composite SMC sont enregistrées en utilisant le dispositif d'EA (voir chapitre 1 section 1.3.3). Le seuil d'acquisition des salves d'EA est fixé à 30dB d'amplitude.

L'EA permet de quantifier l'endommagement qui rend compte de l'évolution de la rigidité du matériau, qui peut être corrélée à l'évolution du temps de relaxation. Nous utilisons plus particulièrement l'EA et l'analyse statistique multivariable (voir chapitre 2) afin de suivre l'énergie élastique libérée par les différents processus microscopiques d'endommagement intervenant dans le matériau au cours des essais. Lier cette énergie au temps de relaxation va permettre d'obtenir plus d'informations sur l'état de santé du matériau.

Notre procédure expérimentale permet donc de corréler le comportement en dynamique lente non-linéaire avec les signaux d'émission acoustique enregistrés *in situ* sur les échantillons de composite SMC base polymère. De plus, la méthode de classification des signaux d'EA va nous permettre d'identifier les

différents modes d'endommagement créés durant les étapes progressives d'endommagement.

5.4 Résultats : dynamique lente non-linéaire et émission acoustique

5.4.1 Emission acoustique

Le suivi de l'endommagement d'une éprouvette de SMC sollicitée en flexion trois points est donc réalisé par EA pour les quatre étapes définies dans le tableau 5.1. La figure 5.4 présente la distribution d'amplitude des salves pour ces quatre étapes. Cette représentation permet déjà de voir qualitativement

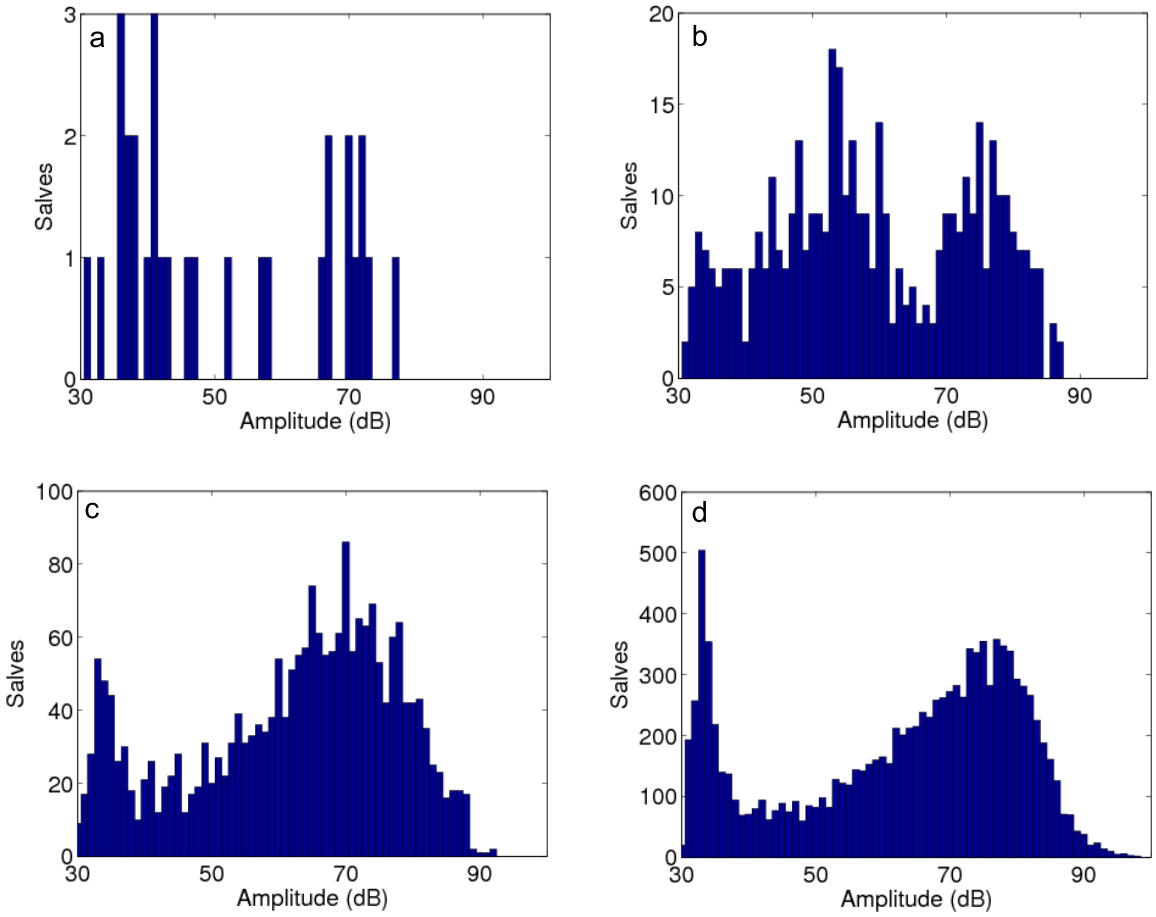


FIG. 5.4 – Distribution d'amplitude des salves pour les quatre étapes d'endommagement sur le SMC sollicité en flexion trois points : (a) d1. (b) d2. (c) d3. (d) d4. L'étape d1 correspond à un déplacement de 0.4mm, d2 de 0.8mm, d3 de 1.2mm et d4 de 1.6mm.

l'apparition de différents mécanismes d'endommagements correspondant à des salves d'amplitudes distinctes. La figure 5.4a, correspondant à la première étape d'endommagement d1, présente peu de salves séparées en deux groupes : un groupe dont l'amplitude est centrée sur 38dB et un autre groupe centré sur 66dB. En figure 5.4b (étape d2), un autre groupe de signaux vient s'ajouter dont l'amplitude moyenne est proche de 80dB, avec peu de signaux dans la zone 63-70dB. Les figures 5.4c et d (étapes d3 et d4)

présentent aussi trois groupes de signaux. Deux groupes de signaux prédominent : un groupe centré sur 38dB pour les étapes d3 et d4, l'autre groupe est centré sur 70dB pour l'étape d3 et sur 80dB pour l'étape d4. L'étape d4 présente aussi un nombre plus important de signaux de faible amplitude (autour de 38dB).

La méthode utilisée pour discriminer les différents types d'endommagement dans le composite SMC à partir des salves d'EA est l'analyse statistique multivariable présentée aux chapitres 2 et 3 composée d'une méthode de classification par coalescence floue associée à une ACP. Pour des raisons énergétiques, les mécanismes d'endommagement dans le SMC sur lesquels l'étude porte sont : la microfissuration matricielle, la décohésion interfaciale fibre/matrice et la rupture de fibre. Les différentes classes obtenues après classification sont corrélées aux mécanismes d'endommagement intervenant dans le SMC. L'étiquetage des classes est réalisé en analysant les caractéristiques des vecteurs de forme composés des descripteurs temporels usuels. De plus, la méthode de classification proposée permet également de suivre l'évolution des différents mécanismes d'endommagement dans le temps et pour chacune des différentes étapes d'endommagement choisies.

Dans ce travail, nous avons choisi de suivre l'évolution de l'énergie absolue *Eabs* libérée qui décrit l'amplitude et la durée des signaux d'EA (voir chapitre 1 section 1.3.4).

L'énergie absolue cumulée libérée pendant l'endommagement du composite SMC, qui correspond aux trois types d'endommagement identifiés, est présentée en figure 5.5 pour les quatre étapes d'endommagement (notées d1 à d4, où d4 correspond à l'apparition de macrofissures sur la surface de l'éprouvette). A noter que les émissions qui ont lieu avant d'atteindre la force appliquée précédemment ne sont pas tracées, c'est pour cela que l'on observe des sauts entre chaque nouvelle étape d'endommagement. Cette figure permet de voir qu'aucune fibre fracturée n'est détectée pendant le premier stade d'endommagement d1. Les fissurations matricielles apparaissent dès le début de l'essai et sont suivies de décohésions. Quelques ruptures de fibres apparaissent en étape d2. Les étapes d'endommagement d2 et d3 sont semblables, c'est-à-dire que les ruptures de fibres sont les plus énergétiques, suivies par les décohésions et puis les fissurations matricielles. Dans l'étape d4, on peut apercevoir que l'énergie des décohésions et des ruptures de fibres augmente fortement. De plus, l'énergie des ruptures de fibres, au début plus faible que celle des décohésions, augmente brusquement et devient très importante. Cela traduit une augmentation brutale du nombre d'événements correspondant aux ruptures de fibres avant la rupture du matériau. Enfin, les différences d'énergie entre les différents mécanismes sont notables ; les ruptures de fibres (quand elles existent) sont dix fois plus énergétiques que les microfissurations de la matrice [98–101].

5.4.2 Effet Kaiser

Pour pouvoir effectuer une corrélation entre EA et dynamique non-linéaire lente afin de caractériser l'endommagement, l'irréversibilité des phénomènes à l'origine de la génération des ondes d'EA, communément appelée Effet Kaiser (EK) (voir la définition au chapitre 1 section 1.3.2), doit être vérifiée.

La figure 5.6 présente les quatre essais de flexion trois points réalisés pour chaque étape d'endommagement. Pour chaque essai, la force appliquée et l'EA (amplitude des salves) sont suivies dès l'application de la force (F=0N). La force et le déplacement appliqués au matériau pour chaque essai sont présentés dans le tableau 5.1. Cette figure montre que le nombre de salves d'EA qui traduit l'endommagement du matériau augmente avec l'étape d'endommagement. On peut également observer la faible présence de

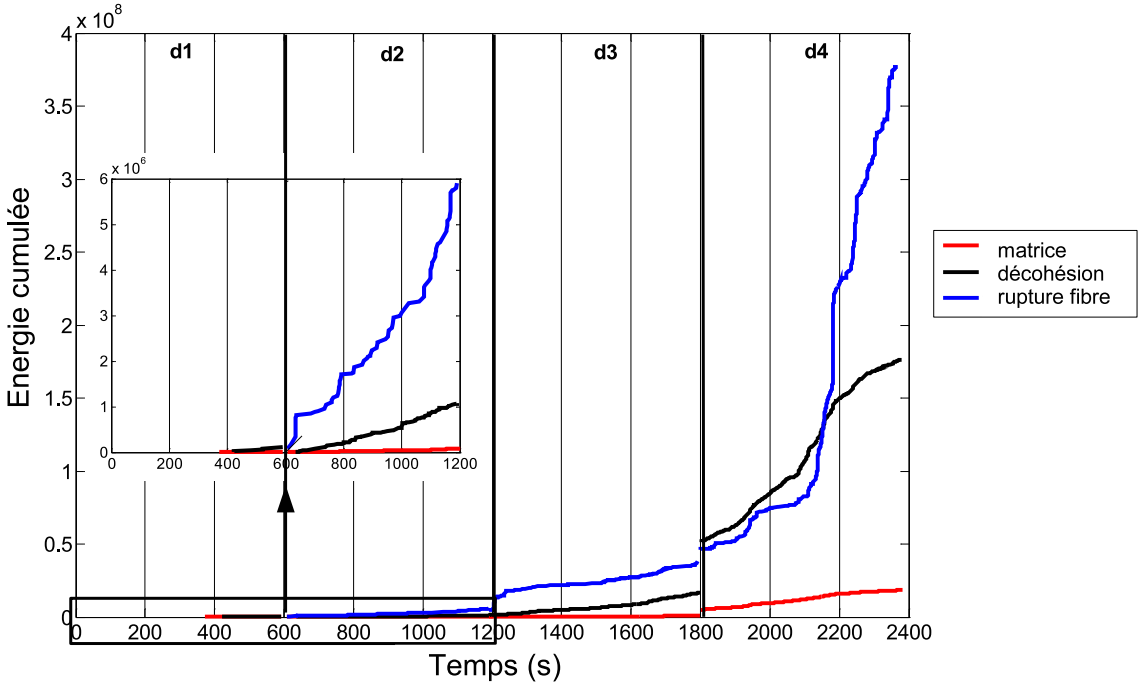


FIG. 5.5 – Energie cumulée des trois types d'endommagement (fissuration matricielle, décohésion interfaciale et rupture de fibre) dans le composite SMC soumis à une flexion quasi statique trois points. Les quatre étapes d'endommagement sont notées d1 à d4.

signaux d'EA pour des valeurs de force inférieures à celles appliquées précédemment (zones en pointillées, F=[0 Fmax]). La force maximale (Fmax) appliquée à l'étape d'endommagement précédente est mise en évidence sur la figure.

On peut également quantifier l'effet Kaiser en utilisant le rapport REK (Rapport Effet Kaiser) défini par :

$$REK = \frac{Eabs_F}{Eabs_{totale}}, \tag{5.6}$$

avec $Eabs_F$ l'énergie absolue cumulée des salves avant que la force maximale de l'étape d'endommagement précédente soit atteinte et $Eabs_{totale}$ l'énergie absolue cumulée de toutes les salves.

Le tableau 5.2 présente les résultats obtenus pour le REK et atteste que pour les essais sur les échantillons de composite SMC endommagés en flexion quasi statique trois points, l'effet Kaiser est satisfait. En effet, seulement 0.37% des salves d'EA sont présentes avant d'atteindre le force préalablement appliquée (F=0.15kN) dans l'étape d'endommagement d2 (voir figure 5.6). Dans l'étape d3, ces salves correspondent à 11.60% des salves totales. Dans l'étape d4, elles représentent 17.78% des salves totales jusqu'au temps t=2000s (qui n'est pas le temps de rupture du matériau).

Dans ce cas, tous les changements observés dans le comportement non-linéaire hystérétique des composites SMC sont dus à l'endommagement croissant au sein des matériaux. Cet endommagement est suivi par l'observation de l'énergie absolue cumulée des salves d'EA qui correspond bien à l'énergie élastique libérée par les différentes microfissures qui apparaissent dans le SMC. En conséquence, l'évolution du

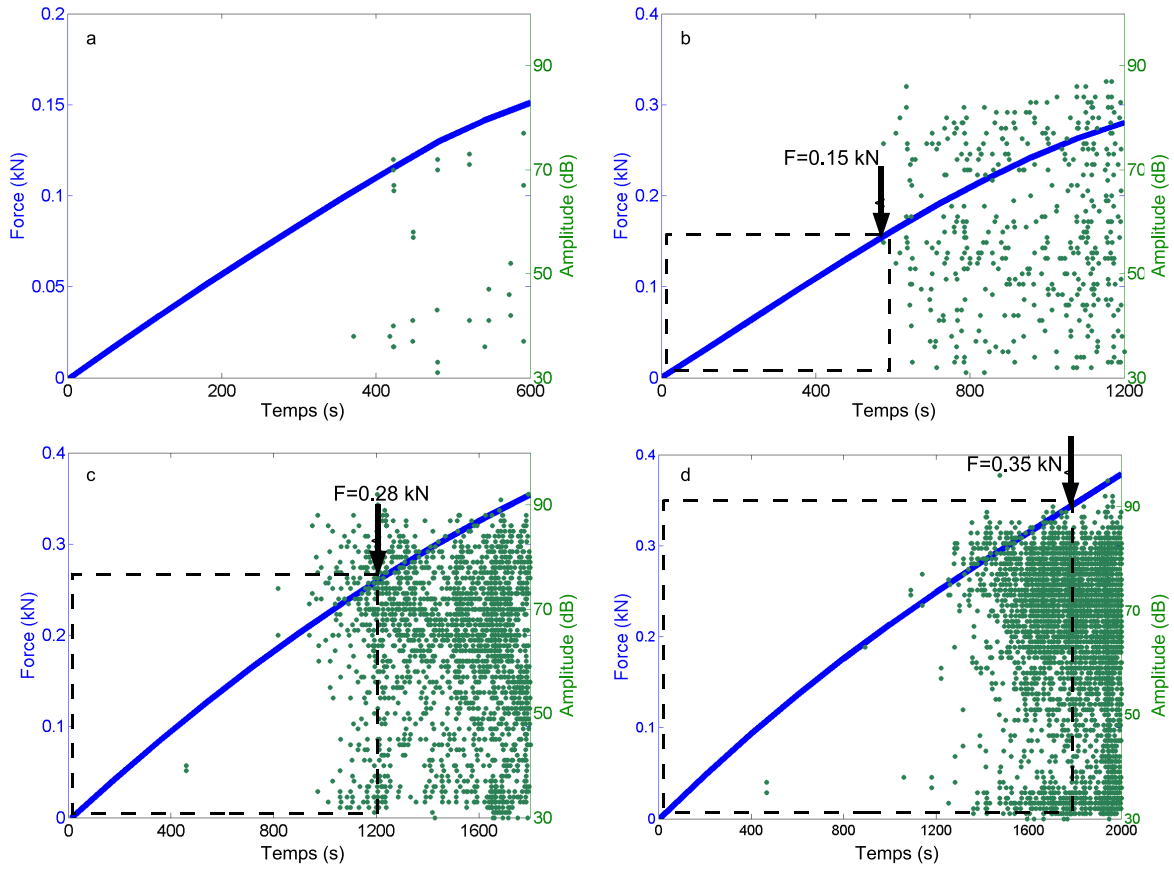


FIG. 5.6 – Evolution de la force appliquée et de l'amplitude des salves en fonction du temps de l'essai pour quatre déplacement en flexion quasi statique trois points : (a) Endommagement d1 correspondant à un déplacement de 0.4 mm. (b) Endommagement d2 : 0.8mm. (c) Endommagement d3 : 1.2 mm. (d) Endommagement d4 : 1.6 mm.

Etape d'endommagement	d1	d2	d3	d4
Energie absolue cumulée (aJ)	1.23×10^5	7.05×10^6	5.56×10^7	5.72×10^8
REK (%)	-	0.37	11.60	17.78

TAB. 5.2 – Quantification de l'effet kaiser.

comportement non-linéaire hystérétique du matériau sera corrélée à l'énergie absolue.

5.4.3 Suivi du temps de relaxation

Dans ces mesures, nous nous intéressons principalement au suivi de la relaxation du SMC (pour le sixième mode de flexion de fréquence f_r) pour quatre états d'endommagement ainsi que pour le matériau pris à l'état intact. Après chaque étape d'endommagement, le mode opératoire pour le suivi du temps de relaxation consiste à exciter le matériau à faible niveau et à relever la fréquence de résonance cor-

respondante f_0. Ensuite pour chaque essai, le matériau est conditionné de la même façon avec un fort niveau constant durant deux minutes pendant lesquelles la fréquence est balayée autour de f_0. Une fois le conditionnement effectué, l'amplificateur est débranché et les temps de relaxation et les valeurs de la fréquence de résonance sont suivis avec le même faible niveau initialement appliqué. Si le matériau retrouve sa fréquence de résonance f_0, alors le mécanisme de restauration est terminé et le conditionnement n'a eu aucun effet supplémentaire sur le matériau. Par contre, si le matériau retourne à une fréquence inférieure à f_0, alors l'accumulation d'énergie dans les zones de contact a induit des ruptures irréversibles de liaisons. Le temps de relaxation est ainsi caractéristique de l'état d'endommagement du matériau.

Les courbes de relaxation obtenues par M. Bentahar [81] présentées en figure 5.7 suivent une loi logarithmique identique à celle trouvée dans d'autres études portant sur d'autres matériaux présentant un comportement hystérétique élastique (roches, bétons, métaux, verre, composites) [13, 92–96, 102]. Ces courbes présentent les valeurs de fréquence de résonance en fonction du temps de relaxation pour les quatre essais correspondant aux quatre étapes d'endommagement ainsi que pour un essai sans endommager le matériau. On peut voir que la relaxation du SMC se comporte qualitativement de la même façon que le matériau soit dans un état intact ou endommagé, sa structure étant fortement hétérogène. De plus, l'augmentation de l'endommagement dans le matériau a pour conséquence d'accroître les temps de relaxation et les décalages fréquentiels. Quantitativement, le temps de relaxation va de 108% à 250% en comparaison avec l'état intact. Les valeurs du temps de relaxation et du décalage fréquentiel en fonction de l'étape d'endommagement sont données dans le tableau 5.3.

Etape d'endommagement	état intact	d1	d2	d3	d4
Décalage fréquentiel (Hz)	44	55	74	95	119
Temps de relaxation (s)	3600	7500	8100	10500	12600

TAB. 5.3 – Effets du conditionnement sur le décalage fréquentiel et le temps de relaxation.

Ainsi, connaissant l'énergie cumulée libérée (tableau 5.2) et les temps de relaxation (tableau 5.3) à l'état sain et pour chaque étape d'endommagement (d1, d2, d3 et d4), il est possible de suivre l'évolution de l'inverse du temps de relaxation en fonction de l'énergie cumulée libérée par le composite SMC.

Sans classification des données d'EA, on ne peut que suivre les variations de la vitesse de relaxation en fonction de l'énergie cumulée pour l'endommagement global intervenant dans le SMC (figure 5.8a). Cette figure montre que le temps de relaxation du SMC a une dépendance logarithmique avec l'énergie élastique libérée suivant l'équation :

$$\frac{1}{t} = a \times log(Eabs) + b \tag{5.7}$$

Les valeurs des coefficients a et b calculées pour chaque type d'endommagement et pour l'endommagement global sont présentées dans le tableau 5.4. Ces coefficients, caractéristiques du matériau étudié, donnent une indication sur le degré d'endommagement dans le matériau.

Cette figure 5.8a montre donc qu'un matériau intact soumis à un conditionnement a une vitesse de relaxation qui va tendre vers l'infini ou inversement un temps de relaxation quasi instantané. Si le même conditionnement est appliqué à un matériau fortement endommagé (plus proche de l'état d'endommagement d4), le temps de relaxation va alors devenir très grand. De plus, on peut remarquer sur cette courbe que les paramètres non linéaires sont plus sensibles à la faible présence d'endommagement que les

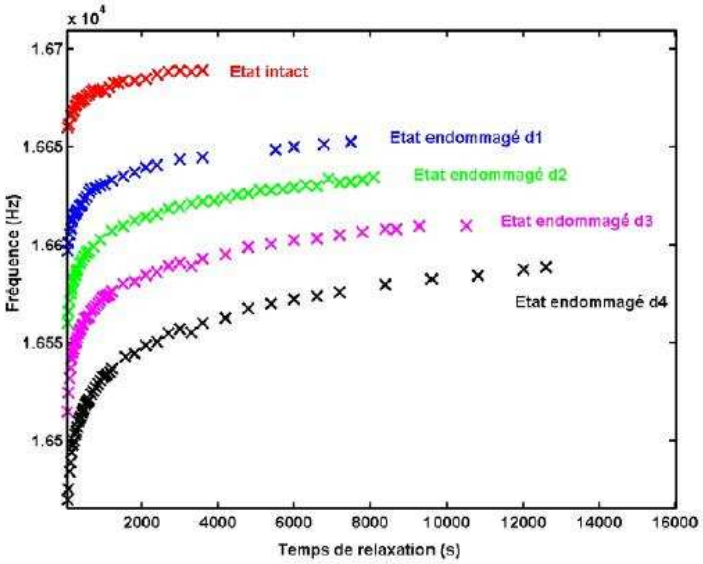


FIG. 5.7 – Evolution logarithmique de la fréquence de résonance du sixième mode de flexion pour l'état intact et pour les quatre états endommagés induits par flexion quasi statique trois points [81]. Les quatre étapes d'endommagement sont notées d1 à d4.

Type d'endommagement	global	fissurations matricielles	décohésions	ruptures de fibre
coefficient a	-6.604×10^{-6}	-6.011×10^{-6}	-7.776×10^{-6}	-1.047×10^{-5}
coefficient b	2.160×10^{-4}	1.814×10^{-4}	2.268×10^{-4}	2.835×10^{-4}

TAB. 5.4 – Valeurs des coefficients a et b correspondant à l'équation 5.7 pour chaque type d'endommagement et pour l'endommagement global.

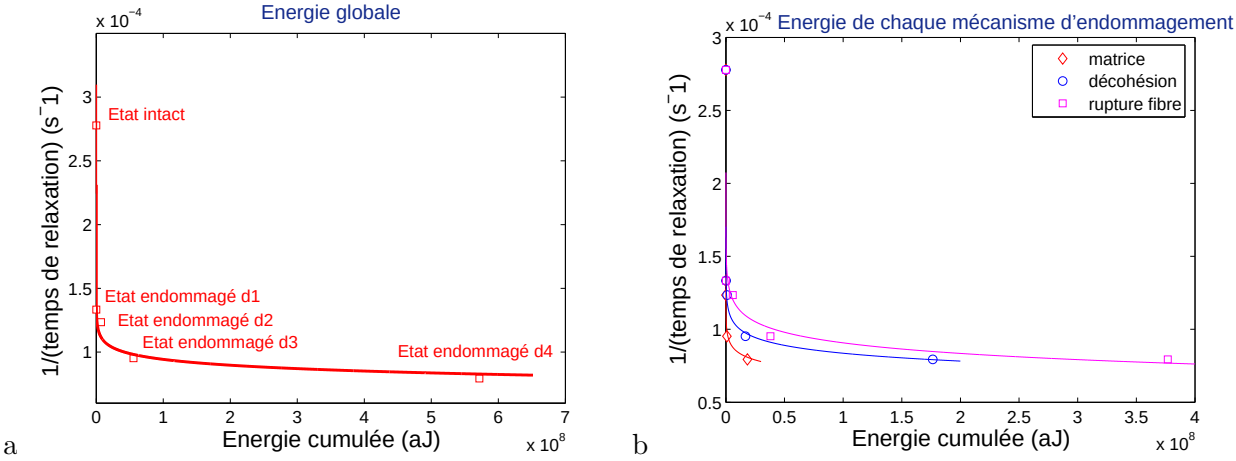


FIG. 5.8 – Evolution de l'inverse du temps de relaxation en fonction de l'énergie cumulée libérée par le composite SMC à l'état intact et pour chaque étape d'endommagement (d1, d2, d3 et d4) : (a) endommagement global. (b) pour chaque mécanisme d'endommagement identifié (fissuration matricielle, décohésion interfaciale et rupture de fibre).

paramètres d'EA, et inversement, les paramètres d'EA sont plus sensibles à fort degré d'endommagement que les paramètres non linéaires.

Il est possible d'utiliser les résultats de classification obtenus précédemment (voir figure 5.5) permettant d'obtenir les valeurs de l'énergie libérée par chaque mécanisme d'endommagement identifié dans le SMC (fissuration matricielle, décohésion interfaciale et rupture de fibre). Lorsque ces différents mécanismes d'endommagement à l'origine des salves d'EA sont séparés, on peut alors savoir comment le temps de relaxation du SMC dépend de l'énergie cumulée libérée par les différents mécanismes (figure 5.8b). Ainsi, on peut observer sur cette figure la même dépendance logarithmique de l'énergie élastique pour chaque mécanisme considéré séparément comme pour la réponse globale mentionnée plus haut (voir tableau 5.4). Cependant, la principale caractéristique du résultat obtenu sur la figure 5.8b est que l'on peut apprécier la vitesse de relaxation de chaque mécanisme d'endommagement. En effet, on peut voir que celle des microfissurations de la matrice est beaucoup plus lente que celle des ruptures de fibres. Ceci est principalement dû au fait que la résine polymère est beaucoup plus viscoélastique que les fibres de verre. Le temps de relaxation des décohésions interfaciales fibre/matrice est intermédiaire [98–101].

5.5 Conclusion

Les résultats originaux présentés dans ce chapitre portent sur le comportement non-linéaire hystérétique d'un matériau composite SMC pris à l'état sain et graduellement endommagé. Les essais de dynamique lente (relaxation) montrent une grande sensibilité à la présence et à l'évolution de l'endommagement induit par des essais de flexion trois points. L'EA offre la possibilité de connaître la contribution des différents types d'endommagement au comportement non-linéaire en dynamique lente. En effet, l'EA est utilisée pour calculer l'énergie élastique libérée par des éprouvettes de composite SMC graduellement endommagées. L'analyse statistique multivariable permet de suivre l'évolution de cette énergie pour chaque mode d'endommagement en fonction du degré d'endommagement dans le matériau. L'évolution de paramètres non linéaires de dynamique lente (vitesse de relaxation notamment) présente une dépendance quasi logarithmique en fonction de l'énergie élastique libérée sous forme d'EA par les différents mécanismes d'endommagement. Cette approche novatrice permet de relier la perte de rigidité à l'échelle macroscopique et l'activité acoustique témoin de l'endommagement à l'échelle microscopique. De plus, les paramètres non linéaires se sont avérés être plus sensibles à la faible présence d'endommagement que les paramètres d'EA qui sont eux un indicateur incontournable au voisinage de la rupture. La corrélation effectuée entre les différents types d'endommagement identifiés dans le matériau SMC et l'évolution du comportement non-linéaire peut permettre de mieux comprendre les mécanismes qui influent sur le comportement non-linéaire hystérétique des matériaux endommagés. Cette étude montre qu'il est possible, dans le cas du matériau composite SMC, d'utiliser l'EA et la dynamique lente non-linéaire pour caractériser l'état de santé et estimer la durée de vie restante de ce matériau hétérogène.

Conclusion générale

Le principal objectif de ce travail est d'améliorer le traitement des données d'EA afin de caractériser les mécanismes d'endommagement de matériaux composites de fabrication industrielle, d'identifier les mécanismes critiques menant à la rupture et d'estimer leur durée de vie restante. La méthodologie utilisée consiste à analyser les signaux d'EA reçus lors d'essais de traction quasi statique sur des composites modèles (résine, composites unidirectionnels), puis lors d'essais de fluage et de flexion quasi statique trois points sur des composites plus complexes tels que des composites stratifiés à plis croisés, des composites Sheet Molding Compound (SMC) et des bétons polymères. Les principaux mécanismes d'endommagement étudiés sont : l'endommagement matriciel, la décohésion fibre/matrice (ou granulat/résine dans le cas du béton polymère), la rupture de fibre ou de granulat et le délaminage pour les composites stratifiés. Pour pouvoir séparer les signaux d'EA provenant des différents modes d'endommagement issus de composites complexes, un outil d'analyse statistique multivariable est mis en place. Il est composé d'un algorithme de classification de données multidimensionnelles (méthode de coalescence floue) et d'une analyse en composantes principales (ACP). Cette méthode offre une classification automatique des données d'EA permettant d'identifier les mécanismes sources d'EA, de suivre leur évolution lors du processus d'endommagement et de mettre en évidence les mécanismes critiques menant à la rupture des matériaux composites.

La classification des données d'EA est d'abord menée en utilisant comme composantes des vecteurs formes, les descripteurs temporels usuels utilisés en EA. Le potentiel de la méthode d'analyse statistique multivariable en terme d'identification des mécanismes d'endommagement a d'abord été validé sur des composites modèles. Les résultats obtenus sur ces matériaux bien connus sont en accord avec les résultats trouvés dans la littérature traitant de l'identification des sources d'EA issus de matériaux composites. La méthode a ensuite été appliquée à des matériaux composites fibre/matrice réputés plus complexes, pour lesquels l'identification des mécanismes d'endommagement reste problématique. Les résultats obtenus sont prometteurs car la méthode proposée offre un bon moyen de discrimination des signaux d'EA même pour des matériaux moins bien maîtrisés. Cependant, les projections par ACP des formes obtenues par la méthode de coalescence floue se sont avérées, dans certains cas, présenter des recouvrements entre les classes rendant les frontières discutables.

Enfin, les composites de type béton polymère ont fait l'objet d'une étude plus approfondie. En effet, peu d'information en terme de processus d'endommagement existe sur ce type de matériaux. Ainsi, afin d'identifier les signatures acoustiques correspondant aux différents mécanismes d'endommagement présents dans ce matériau, des échantillons de bétons de formulations différentes en terme de matrice et de renfort ont été testés (en gardant si possible les mêmes proportions de matrice et de renforts) : résine époxy pure, granulats et résine, sable fin et résine, béton polymère. Par exemple, les essais sur

la résine seule ont permis d'identifier les signaux correspondant à la fissuration matricielle. Ces essais supplémentaires ont ainsi permis d'isoler certains types d'endommagement, ont facilité l'attribution des événements détectés par EA aux mécanismes d'endommagement de ces matériaux et ont permis de valider les identifications réalisées sur le béton polymère. De plus, une analyse microscopique post-mortem des éprouvettes à l'aide d'un microscope électronique à balayage a permis de valider l'existence des mécanismes d'endommagement identifiés par EA sur ce type de matériau (fissuration matricielle, décohésion granulat/résine, rupture de granulat).

Cependant, l'analyse limitée à l'étude des paramètres temporels n'est pas toujours pertinente pour caractériser les ondes acoustiques, notamment pour des composites de nature complexe où l'on peut observer des recouvrements des formes dans les projections obtenues par ACP. Ainsi, dans le but d'obtenir des informations supplémentaires sur les signaux d'EA non stationnaires, une méthode originale consiste à utiliser les transformées en ondelettes continues et discrètes. Un autre objectif de notre travail est d'améliorer l'identification des différents mécanismes d'endommagement pouvant intervenir dans les matériaux composites sous charge en définissant de nouveaux descripteurs temps-fréquence ou temps-échelle pour la classification. Les transformées en ondelettes continues et discrètes se sont avérées bien adaptées aux signaux d'EA et elles permettent de différencier des signaux typiques d'EA provenant de sources d'endommagement différentes telles que les microfissurations matricielles, les décohésions interfaciales fibre/matrice et les ruptures de fibre. Ainsi, des paramètres quantitatifs ont pu être extraits de ces transformées. Ces nouveaux descripteurs temps-échelle sont utilisés comme composantes des vecteurs formes pour la classification. Ils permettent d'améliorer la classification des différents mécanismes d'endommagement. En effet, la visualisation par ACP des formes obtenues après classification montre que les classes obtenues sont mieux différenciées qu'avec les descripteurs temporels pour des composites modèles et des composites plus complexes tels que les SMC de fabrication industrielle. Une des perspectives de ce travail serait d'appliquer cette méthode à des matériaux présentant un plus fort degré d'hétérogénéité.

Enfin, l'étude présentée en fin de thèse a pour objectif d'utiliser une technique de caractérisation non linéaire ultrasonore pour détecter et suivre l'évolution de l'endommagement de matériaux hétérogènes et ce pour une meilleure estimation de leur durée de vie. Nous avons choisi d'étudier un composite de fabrication industrielle tel que le SMC pris à l'état sain et graduellement endommagé qui présente un comportement non-linéaire hystérétique. Les essais de dynamique lente (relaxation) ont montré une grande sensibilité à la présence et à l'évolution de l'endommagement induit par des essais de flexion trois points. L'EA est utilisée pour calculer l'énergie élastique libérée par les éprouvettes de composite SMC graduellement endommagées. L'analyse statistique multivariable permet de suivre l'évolution de cette énergie pour chaque mode d'endommagement en fonction de chaque étape d'endommagement. En reliant les paramètres non linéaires de dynamique lente et d'EA en fonction du degré d'endommagement du matériau, nous avons pu montrer que les paramètres non linéaires (vitesse de relaxation notamment) évoluent de manière quasi logarithmique en fonction de l'énergie élastique libérée sous forme d'EA par les différents mécanismes d'endommagement. Cette approche permet de corréler la perte de rigidité à l'échelle macroscopique et l'activité acoustique témoin de l'endommagement à l'échelle microscopique. De plus, les paramètres non linéaires se sont avérés être plus sensibles à la faible présence d'endommagement que les paramètres d'EA qui sont eux un indicateur incontournable au voisinage de la rupture. La relation effectuée entre les différents types d'endommagement identifiés par EA dans le matériau SMC et l'évolution du comportement non-linéaire en dynamique lente peut permettre de mieux comprendre

les mécanismes qui influent sur le comportement non-linéaire hystérétique des matériaux endommagés et offre ainsi la possibilité de caractériser l'état de santé et d'estimer la durée de vie restante des matériaux hétérogènes. Les résultats obtenus montrent la pertinence de notre méthode de classification pour le suivi de l'endommagement et offrent de nouvelles possibilités d'étude des comportements non-linéaires hystérétiques de nombreux matériaux.

Bibliographie

[1] K. Ono, Acoustic emission, Encyclopedia of acoustics, Wiley, 1997.

[2] S. Barre, M.-L. Benzeggagh, On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fiber reinforced polypropylene, Composites Science and Technology, vol.52, 1994, pp.369-76.

[3] S. Huguet, Application de classificateurs aux données d'émission acoustique : identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère, Thèse à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2002.

[4] V. Kostopoulos, T.H. Loutas, A. Kontsos, G. Sotiriadis, Y.Z. Pappas, On the identification of the failure mechanisms in oxide/oxide composites using acoustic emission, Nondestructive Testing and Evaluation Int., vol.36, 2003, pp.571-580.

[5] N. Godin, S. Huguet, R. Gaertner, Integration of the Kohonen's self-organising map and k-means algorithm for the segmentation of the AE data collected during tensile tests on cross-ply composites, Nondestructive Testing and Evaluation Int., vol.38, 2005, pp.299-309.

[6] J.C. Bezdek, Pattern recognition with fuzzy objective function algortithms, Plenum Press, New-York, 1981.

[7] I.T. Jolliffe, Principal Component Analysis, Springer-Verlag, 1986.

[8] A. Gallego, J.F. Gil, J.M. Vico, J.E. Ruzzante, R. Piotrkowski, Coating adherence in galvanized steel assessed by acoustic emission wavelet analysis, Scripta Materialia, vol.52, 2005, pp.1069-74.

[9] M. Johnson, Waveform based clustering and classification of AE transients in composite laminates using principal component analysis, Nondestructive Testing and Evaluation Int., vol.35, 2002, pp.367-76.

[10] A. Marec, J.-H. Thomas, R. El Guerjouma, Damage characterization of polymer-based composite materials : Multivariable analysis and wavelet transform for clustering acoustic emission data, Mechanical Systems and Signal Processing, vol.22(6), 2008, pp.1441-1464.

[11] M. Bruneau, C. Potel, Matériaux et Acoustique 3 : caractérisation des matériaux, contrôle non destructif et applications médicales, Hermès Science Publication, Lavoisier, 2006.

[12] Y. Zheng, R. G. Maev, I. Y. Solodov, Nonlinear acoustic applications for materials characterization, Can. J. Phys., vol.77, 1999, pp.927-967.

[13] M. Bentahar, H. Elaqra, M. Griffa, R. El Guerjouma, M. Scalerandi, Physical Review B, vol.73, 2006, pp.014116.

[14] J.-M. Berthelot, Matériaux composites-Comportement mécanique et analyse des structures, 3ème édition. Paris Éditions Tech. & Doc., 1999.

[15] H. Nechad, Evaluation de l'endommagement et de la rupture de matériaux hétérogènes par ultrasons et émission acoustique : Estimation de la durée de vie restante, Thèse à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004.

[16] H. Nechad, A. Helmstetter, R. El Guerjouma, D. Sornette, Creep ruptures in heterogeneous materials, Physical Review Letters, vol.94, 2005.

[17] R. El Guerjouma, J.C. Baboux, D. Ducret, N. Godin, P. Guy, S. Huguet, Y. Jayet, T. Monnier, Non-destructive evaluation of damage and failure of fiber reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission, Advanced engineering materials, vol.3, 2001, pp.601-608.

[18] J.G.M. Van Mier, Micromechanical Analysis of Fracture of Concrete, International Journal of Damage Mechanics, Vol.1(4), 1992, pp.435-454.

[19] B. Diouf, Analyse statistique de l'évolution de l'endommagement dans des matériaux hétérogènes, Thèse à l'Université du Maine, 2005.

[20] AG. Beattie, Acoustic emission, principles and instrumentation, Journal of acoustic emission, vol.2(1/2), 1983, pp.95-128.

[21] A. Nielsen, Acoustic Emission Source based on Pencil Lead Breaking, The Danish Welding Institute Publication, vol.80, 1980, pp.15.

[22] T. Boczar, M. Lorenc, Determining the repeatability of acoustic emission generated by the HSU-Nielsen calibrating source, Molecular and Quantum Acoustics, vol.25, 2004, pp.177-192.

[23] O. Chen, P. Karandikar, N. Takeda, T. Kishi, Acoustic emission characterization of a glass-matrix composite, Nondestructive Testing and Evaluation, vol.8-9, 1992, pp.869-878.

[24] S.-T. Kim, Y.-T. Lee, Characteristics of damage and fracture process of carbon fiber reinforced plastic under loading-unloading test by using AE method, Materials Science and Engineering, vol.A234-236, 1997, pp.322-326.

[25] G. Kotsikos, J. T. Evans, A. G. Gibson, J. Hale, Use of acoustic emission to characterize corrosion fatigue damage accumulation in glass fiber reinforced polyester laminates, Polymer Composites, vol.20(5), 1999, pp.689-696.

[26] O. Ceysson, M. Salvia, L. Vincent, Damage mechanisms characterisation of carbon fibre/epoxy composite laminates by both electrical resistance measurements and acoustic emission analysis, Scripta Materialia, vol.34(8), 1996, pp.1273-1280.

[27] N. Ativitavas, T. Fowler, T. Pothisiri, Acoustic emission characteristics of pultruded fiber reinforced plastics under uniaxial tensile stress, Proc. of European WG on AE, Berlin, 2004, pp.447-54.

[28] C. Ramirez-Jimenez, N. Papadakis, N. Reynolds, Identification of failure modes in glass/polypropylene composites by means of the primary frequency content of the acoustic emission events, Composites Science and Technology, vol.64, 2004, pp.819-27.

[29] J. Bohse, Damage analysis of polymer matrix composites by acoustic emission testing, Proc. of European WG on AE, Berlin, 2004, pp.339-48.

[30] M. Giordano, A. Calabro, C. Esposito, A. D'Amore, L. Nicolais, An acoustic-emission characterization of the failure modes in polymer-composite materials, Composites Science and Technology, vol.58, 1998, pp.1923-28.

[31] Q.-Q. Ni, M. Iwamoto, Wavelet transform of acoustic emission signals in failure of model composites, Engineering Fracture Mechanics, vol.69, 2002, pp.717-728.

[32] P.J. De Groot, P.A.M. Wijnen, R.B.F. Janssen, Real time frequency determination of acoustic emission for different fracture mechanisms in carbon/epoxy composites, Composites Science and Technology, vol.55, 1995, pp.405-12.

[33] S. S. Russell, E. G. Henneke, Signature analysis of acoustic emission from graphite/epoxy composites, Interim report, NASA Grant NSG 1238, Report No.VPI-E-77-22, 1977.

[34] M. Suzuki, H. Nakanishi, M. Iwamoto, E. Jinen, Application of static fracture mechanisms to fatigue fracture behavior of class A-SMC composite, Proc. 4th Japan-US Conf. on Composite Materials, 1988, pp.297-306.

[35] M. Suzuki, S. Kida, M. Shimbo, Y. Miyano,Effects of fiber content on fracture mechanisms of short fiber reinforced PET composites, Proc. 8th Int. Conf on Composite Materials, Vol. 3, ed. S. W. Tsai and G. S. Springer, 1991.

[36] K. Komai, K. Minoshima, T. Shibutani, Investigations of the fracture mechanism of carbon/epoxy composites by AE signal analyses, JSME Int. J., vol.34, 1991.

[37] M.A. Hamstad, A. O'Gallagher, J. Gary, A wavelet transform applied to acoustic emission signals : part 1 : source identification, Journal of acoustic emission, vol.20, 2002, pp.39-61.

[38] D.B.B. Ferreira, R.R. Da Silva, J.M.A. Rebello, M.H.S. Siqueira, Failure mechanism characterisation in composite materials using spectral analysis and the wavelet transform of acoustic emission signals, INSIGHT, vol.46(5), 2004, pp.282-289.

[39] H. Suzuki, T. Kinjo, Y. Hayashi, M. Takemoto, K. Ono, Wavelet transform of acoustic emission signals, Journal of acoustic emission, vol.14, 1996, pp.69-84.

[40] T.H. Loutas, V. Kostopoulos, C. Ramirez-Jimenez, M. Pharaoh, Damage evolution in center-holed glass/polyester composites under quasi-static loading using time/frequency analysis of acoustic emission monitored waveforms, Composites Science and Technology, vol.66, 2006, pp.1366-75.

[41] T.H. Loutas, G. Sotiriades, V. Kostopoulos, On the application of wavelet transform of AE signals from composite materials, Proc. of European WG on AE, Berlin, vol.42, 2004, pp.433-445.

[42] G. Qi, A. Barhorst, J. Hashemi, G. Kamala, Discrete wavelet decomposition of acoustic emission signals from carbon-fiber-reinforced composites, Composites Science and Technology, vol.57, 1997, pp.389-403.

[43] R. Piotrkowski, A. Gallego, E. Castro, M.T. Garcia-hernandez, J.E. Ruzzante, Ti and Cr nitride coating/steel adherence assessed by acoustic emission wavelet analysis, Nondestructive Testing and Evaluation Int., vol.38, 2005, pp.260-67.

[44] R. Dubes, A.K. Jain, Clustering techniques : the user's dilemna, Pattern Recognition, vol.8, 1976, pp.247-260.

[45] A. Likas, N. Vlassis, J. Verbeek, The global k-means clustering algorithm, Pattern Recognition, vol.366(2), 2003, pp.451-61.

[46] A.A. Anastassopoulos, T.P. Philippidis, Clustering methodology for the evaluation of acoustic emission from composites, Journal of Acoustic Emission, vol.13(1/2), 1995, pp.11-22.

[47] K. Ono, Q. Huang, Pattern recognition analysis of acoustic emission signals, Progress in Acoustic Emission VII, The Japanese Society for NDI, 1994, pp.69-78.

[48] K. Hattori, M. Takahashi, A new nearest-neighbor rule in the pattern classification problem, Pattern Recognition, vol.32, 1999, pp.425-432.

[49] Y. Z. Pappas, Y. P. Markopoulos, V. Kostopoulos, Failure mechanisms analysis of 2D carbon/carbon using acoustic emission monitoring, Nondestructive Testing and Evaluation Int., vol.31, 1998, pp.157-63.

[50] N. Godin , S. Huguet, R. Gaertner, L. Salmon, Clustering of acoustic emission signals collected during tensile tests on unidirectionnal glass/polyester composites using supervised and unsupervised classifiers, Nondestructive Testing and Evaluation Int., vol.37, 2004, pp.253-64.

[51] T. Kohonen, Self-organized network, Proc. IEEE, vol. 43, 1990, pp.59-69.

[52] T. Kohonen, Self-organization and associative memory, Berlin : Springer-Verlag, 1984.

[53] R. De Oliveira, C.A. Ramos, A.T. Marques, Applications of the wavelet transform to the modal analysis of clustered AE waveforms, Smart Structures and Systems, submitted for publication, 2006 (communication privée).

[54] B. Dubuisson, Diagnostic, intelligence artificielle et reconnaissance des formes, Hermès Science Pub., 2001.

[55] E. Oja, Neural networks, principal components, and subspaces, International Journal of Neural Systems, vol.1, 1989, pp.61-68.

[56] C. Ding, X. He, K-means Clustering via Principal Component Analysis, Proc. of Int. Conf. on Machine Learning (ICML), Canada, 2004, pp.225-232.

[57] P. C. Mahalanobis, Proc. National Institute of Science of India, vol.2, 1936, pp.49.

[58] M. Halkidi, Y. Batistakis, M. Vazirgiannis, On Clustering Validation Techniques, Journal of Intelligent Information Systems, vol.17, 2001, pp.107-145.

[59] A.M. Bensaid, L.O. Hall, J.C. Bezdek, L.P. Clarke, M.L. Silbiger, J.A. Arrington, R.F. Murtagh, Validity-guided (Re)Clustering with applications to image segmentation, Proc. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 4, 1996, pp.112-123.

[60] J.C. Dunn, Well Separated Clusters and Optimal Fuzzy Partitions, J. Cybern., vol.4, 1974, pp.95-104.

[61] C . Frelicot, M.H. Masson, B. Dubuisson, Reject options in fuzzy classification rules, Proc. EUFIT'95, vol. 3, 1995, pp.1464-1495.

[62] M. H. Masson, B. Dubuisson, C. Frelicot, Conception d'un module de reconnaissance des formes floues pour le diagnostic, RAIRO-APII-JESA, 1996, pp.319-341.

[63] R. El Guerjouma, A. Marec, H. Nechad, J.-H. Thomas, Matériaux et Acoustique 3, caractérisation des matériaux, contrôle non destructif et applications médicales, Chapitre 1. Méthodes linéaires de contrôle et d'évaluation non destructifs par ultrasons, Paragraphe 5. Evaluation et contrôle de santé des matériaux composites par ultrasons et émission acoustique, Hermès Science Publication, Lavoisier, 2006.

[64] A. Marec, J.-H. Thomas, R. El Guerjouma, R. Berbaoui, Investigation of damage mechanisms of composite materials : Multivariable analysis based on temporal and wavelet features extracted from acoustic emission signals, 5èmes journées du GDR 2501, Anglet, 2008, (à être publié dans The Springer Series on Wave Phenomena).

[65] A. Marec, J.-H. Thomas, R. El Guerjouma, Etude multivariable par émission acoustique de l'endommagement et de la rupture des matériaux composites sollicités en fluage, Proc. CFA, Tours, 2006, pp.793-796.

[66] A. Marec, J.-H. Thomas, R. El Guerjouma, Multivariable analysis and wavelet transform of Acoustic Emission data for damage analysis of composite materials, Proc. International Congress on Ultrasonics, Vienna, 2007.

[67] A. Marec, J.-H. Thomas, R. El Guerjouma, Discrimination des processus d'endommagement de matériaux composites : étude multivariable et transformée en ondelettes de signaux d'émission acoustique, Proc. GRETSI, Troyes, 2007, pp.1085-1088.

[68] A. Marec, J.-H. Thomas, R. El Guerjouma, Contrôle de santé et caractérisation de l'endommagement de matériaux composites base polymère par analyse multivariable temporelle et temps-échelle de signaux d'émission acoustique, Proc. COFREND, Toulouse, 2008.

[69] A. Marec, J.-H. Thomas, R. El Guerjouma, Investigation of damage mechanisms of composite materials : multivariable analysis based on temporal and wavelet features extracted from acoustic emission signals, Proc. Acoustics'08, Paris, 2008, pp.597-601.

[70] B. Torrésani, Analyse continue par ondelettes, InterEditions/CNRS Editions, 1995.

[71] A. Grossman, J. Morlet, Decomposition of functions into wavelets of constant shape, and related transforms. In Mathematics and physics, lecture on recent results (ed. L. Streit) Singapore : World Scientific, 1987.

[72] S. Mallat, A wavelet tour of signal processing, Academic Press, 1998.

[73] F. Truchetet, Ondelettes pour le signal numérique, Hermes, 1998.

[74] A. Cohen, R.D. Ryan, Wavelets and multiscale signal processing, Chapman-Hall, 1995.

[75] Y. Meyer, Les ondelettes : algorithmes et applications, A. Colin, 1992.

[76] W.J. Staszewski, A.N. Robertson, Time-frequency and time-scale analyses for structural health monitoring, Phil. Trans. R. Soc. A, vol.365, 2007, pp.449-477.

[77] I. Daubechies, Ten Lectures on Wavelets, Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), Philadelphia, 1992.

[78] C. Torrence, G. P. Compo, A Practical Guide to Wavelet Analysis, Bulletin of the American Meteorological Society, vol.79(1), 1998, pp.61-78.

[79] A. Grinsted, J. C. Moore, S. Jevrejeva, Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series, Nonlinear Processes in Geophysics, vol.11, 2004, pp.561-566.

[80] C. H. de Trad, Q. Fang, I. Cosic, Protein sequence comparison based on the wavelet transform approach, Protein Engineering, vol.15(3), 2002, pp.193-203.

[81] M. Bentahar, Acoustique non linéaire : Application à la caractérisation ultrasonore de l'endommagement des matériaux hétérogènes et à la prédiction de la durée de vie, Thèse : INSA de Lyon, 2005.

[82] L. A. Ostrovsky, P. A. Johnson, Dynamic nonlinear elasticity of geomaterial, Rivista del Nuevo Cimento, vol.24, 2001, pp.1-46.

[83] V.E. Nazarov, L. A. Ostrovsky, I. A. Soustova, A. Sutin, Nonlinear acoustics of micro-inhomogeneous media, Phys. Earth Planet Inter., vol.50, 1998, pp.65-73.

[84] M. Bruneau, C. Potel, Matériaux et Acoustique 2, ch.2, Hermès Science Publication, Lavoisier, 2006.

[85] A. V. Granato, K. Luke, The vibrating string model of dislocation damping, Phys. Acoustics, Principles and Methods, vol.4, part A, Academic Press, New York, 1966.

[86] A. S. Nowick, Variation of amplitude-dependent interval friction in single crystal copper with frequency and temperature, Physical Review, vol.80, 1950, pp.249-257.

[87] K. Van-den-Abeele, P. A. Johnson, R. Guyer, K. McCall, On the quasi-analytic treatment of hysteretic nonlinear response in elastic wave propagation, J. Acoust. Soc. Am., vol.101(4), 1996, pp.1885-1898.

[88] L. Landau, E. Lifchitz, Physique théorique, Théorie de l'élasticité, tome VII, Moscou :MIR, 1967.

[89] M. Muller, A. Sutin, R. Guyer, M. Talmant, P. Laugier, P. A. Johnson, Nonlinear resonant ultrasound spectroscopy (NRUS) applied to damage assessment in bone, J. Acoust. Soc. Am., vol.118(6), 1996, pp.3946-3952.

[90] J. A. TenCate, D. Pasqualini, S. Habib, K. Heitmann, D. Higdon, P. A. Johnson, Nonlinear and Nonequilibrium Dynamics in Geomaterials, Physical Review Letters, vol.93(6), 2004, pp.065501-1/065501-4.

[91] K. Van-den-Abeele, P. A. Johnson, A. Sutin, Micro-damage diagnostics using non linear elastic wave spectroscopy, Nondestructive Testing and Evaluation Int., vol.34, 2001, pp.239-248.

[92] P. A. Johnson, A. Sutin, Slow dynamics and anomalous nonlinear fast dynamics in diverse solids, J. Acoust. Soc. Am., vol.117(1), 2005, pp.124-130.

[93] P. Delsanto, M. Scalerandi, Modelling nonclassical nonlinearity, conditionning and slow dynamics effects in mesoscopic elastic materials, Physical Review B, vol.68(1), 2003, pp.0641071-0641079.

[94] V. Zaitsev, V. Gusev, B. Castagnède, Thermoelastic mechanism for logarithmic slow dynamics and memory in elastic wave interactions with individual cracks, Physical Review Letters, vol.90(7), 2003, pp.0755011-0755014.

[95] M. Bentahar, R. El Guerjouma, R. Monnier, L. Deville, Slow and fast dynamics to control damage in heterogeneous materials : application to concrete and glass/fiber polymer, Journal of Advanced Science, vol.17, 2005, pp.70-75.

[96] R. Guyer, P. A. Johnson, Physics Today, April 1999, pp.30-36.

[97] J.A. Tencate, New nonlinear acoustic techniques for NDE, Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, vol.20, 2001, pp.1229-1235.

[98] M. Bentahar, A. Marec, R. El Guerjouma, J.-H. Thomas, Non linear acoustic fast and slow dynamics of damaged composite materials : correlation with acoustic emission, 5èmes journées du GDR 2501, Anglet, 2008, (à être publié dans The Springer Series on Wave Phenomena).

[99] M. Bentahar, A. Marec, R. El Guerjouma,J.-H. Thomas, V. Tournat, Experimental Investigations on Non-Linear Slow Dynamics of Damaged Materials : Correlation with Acoustic Emission, 18th International Symposium on Nonlinear Acoustics, Stockholm, 2008, Proc. American Institute of Physics, vol.1022(1), 2008, pp.501-504.

[100] M. Bentahar, A. Marec, R. El Guerjouma, J.-H. Thomas, V. Tournat, Experimental Investigations on Non-Linear Slow Dynamics of Damaged Materials : Correlation with Acoustic Emission, Applied Physics Letters, (accepté pour publication) 2008.

[101] M. Bentahar, A. Marec, R. El Guerjouma, J.-H. Thomas, Fast and Slow Dynamics in Damaged Materials : Correlation to Acoustic Emission, Proc. Acoustics'08, Paris, 2008.

[102] J.A. Tencate, E. Smith, R.A. Guyer, Physical Review Letters, vol.85(5), 2000, pp.1020-1023.

Résumé

La caractérisation de l'endommagement de matériaux composites verre/époxy et verre/polyester est étudiée *in situ* par émission acoustique (AE). Une méthode d'analyse statistique multivariable non supervisée (coalescence floue) associée à une analyse en composantes principales sont utilisées afin de classifier les signaux enregistrés par EA. L'analyse des classes obtenues permet de les corréler aux mécanismes d'endommagement susceptibles de se produire dans les matériaux étudiés, de suivre l'évolution des différents modes d'endommagement au cours des essais et de détecter les mécanismes les plus critiques menant à la rupture des matériaux. L'étude est d'abord validée sur des composites modèles tels que des composites unidirectionnels puis elle est appliquée à des matériaux plus complexes tels que des plis croisés, des sheet molding compound (SMC) et des bétons polymères soumis à différentes sollicitations mécaniques (traction, fluage, flexion trois points).
Les signaux d'EA générés par des matériaux hétérogènes ne sont pas stationnaires. Ainsi, les transformées en ondelettes continues et discrètes sont appliquées sur des signaux typiques d'EA représentatifs de trois modes d'endommagement (microfissuration matricielle, décohésion, rupture de fibre). De nouveaux descripteurs temps-échelle sont définis à partir de ces transformées et sont introduits dans la méthode de classification. Appliqués à des matériaux plus complexes sollicités mécaniquement, ils permettent d'obtenir une meilleure identification de leurs mécanismes d'endommagement qu'avec l'utilisation de descripteurs temporels.
Enfin, une étude par acoustique non-linéaire en résonance de matériaux composites SMC graduellement endommagés est menée. Les essais de dynamique lente montrent une grande sensibilité à la présence et à l'évolution de l'endommagement. La classification à partir des signaux d'EA permet de connaître la contribution des différents mécanismes d'endommagement au comportement non-linéaire en dynamique lente lors du processus d'endommagement du matériau.

Mots-clés : Matériaux composites, Endommagement, Rupture, Emission acoustique, Reconnaissance des formes, Ondelettes, Acoustique non-linéaire.

Abstract

Local damage in glass/epoxy and glass/polyester composite materials is investigated with the analysis of the signals of acoustic emission (AE). Unsupervised pattern recognition analyses (fuzzy c-means clustering) associated with a principal component analysis are the tools used for the classification of the monitored AE events. A cluster analysis of AE data is achieved and the resulting clusters are correlated to the damage mechanisms of the material under investigation. The proposed method also shows the time evolution of different damage mechanisms till the global failure. Thus the most critical damage mechanisms are identified. After being validated on model samples composed of unidirectional composites, this method is applied to actual composites such as cross-ply composites, sheet molding compound (SMC) and polymer concretes damaged with tensile, creep and three-point bending tests.
Furthermore, AE signals generated by heterogeneous materials are not stationary. Thus, continuous and discrete wavelet transforms are applied on typical damage mechanisms AE signals such as matrix cracking, debonding, fiber failure. Time-scale descriptors are defined from these wavelets and are introduced in the classification process. They provide a better discrimination of damage mechanisms than some time-based descriptors for more complex composite materials.
Finally, gradually damaged SMC composite materials are experimented with nonlinear slow dynamics tests. Nonlinear slow dynamics have been found to be very sensitive to damage evolution. Clustering of AE signals enables to understand the contribution of the different damage mechanisms to the evolution of the nonlinear behavior of damaged SMC.

Keywords : Composite materials, Damage, Fracture, Acoustic Emission, Pattern recognition, Wavelet analysis, Nonlinear acoustic.