



**HAL**  
open science

# Caractérisation non destructive des matériaux composites en fatigue : diagnostic de l'état de santé et pronostic de la durée de vie résiduelle par réseaux de neurones

Pierre Duchene

► **To cite this version:**

Pierre Duchene. Caractérisation non destructive des matériaux composites en fatigue : diagnostic de l'état de santé et pronostic de la durée de vie résiduelle par réseaux de neurones. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai, 2018. Français. NNT : 2018MTLD0008 . tel-03060394

**HAL Id: tel-03060394**

**<https://theses.hal.science/tel-03060394>**

Submitted on 14 Dec 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# THÈSE

présentée en vue d'obtenir le grade de

## DOCTEUR

en

Mécanique des solides, des matériaux, des structures et des surfaces

par

**Pierre DUCHENE**

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE DELIVRÉ PAR IMT LILLE DOUAI

**CARACTÉRISATION NON DESTRUCTIVE DES MATÉRIAUX COMPOSITES  
EN FATIGUE : DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DE SANTÉ ET PRONOSTIC DE LA DURÉE  
DE VIE RÉSIDUELLE PAR RÉSEAUX DE NEURONES**

Soutenance le 13 décembre 2018 devant le jury d'examen :

Président du jury	<b>Joseph MOYSAN, Prof</b>	Université d'Aix-Marseille
Rapporteur	<b>Mourad BENTAHAR, MCF.HDR</b>	Université du Maine
Rapporteur	<b>Nathalie GODIN, MCF.HDR</b>	INSA de Lyon
Membre	<b>Marc DUQUENNOY, Prof</b>	Université Polytechnique Hauts-de-France
Directeur de thèse	<b>Patricia KRAWCZAK, Prof</b>	IMT Lille Douai
Co-directeur de thèse	<b>Salim CHAKI, MA.HDR</b>	IMT Lille Douai
Invitée	<b>Bénédicte LEVASSEUR, Dr</b>	DGA

Laboratoire d'accueil

Département Technologie des Polymères et Composites & Ingénierie Mécanique de IMT Lille Douai  
Ecole Doctorale SMRE 104 (U. Lille, U. Artois, ULCO, UPHF, Centrale Lille, Chimie Lille, IMT Lille Douai)

Thèse co-financée par la







## Remerciements

Je tiens à remercier mes deux directeurs de thèse Patricia Krawczak et Salim Chaki, pour leur confiance tout au long de ces trois années d'études et leurs efforts pour que ce travail aboutisse favorablement. Ce fut une joie particulière de travailler sous leur égide.

J'aimerais également remercier Bénédicte Levasseur, et à travers elle toute la DGA, pour les échanges bénéfiques de nos différentes réunions.

Par ailleurs, je souhaite remercier Mr Joseph Moysan d'avoir présidé mon jury de thèse, Mme Nathalie Godin ainsi que Mr Mourad Bentahar pour avoir accepté d'être rapporteurs sur mon travail. Je témoigne également toute ma reconnaissance à Mr Marc Duquennoy pour l'examen mes travaux.

J'exprime toute ma reconnaissance au personnel du département TPCIM pour leur soutien et les excellentes conditions de réalisation de la thèse, notamment les enseignants chercheurs : Dmytro, André Château, Abderrahmane. J'ai également une pensée particulière pour les responsables des moyens d'essais Pierre, Jean-Pierre, Patrice, Jean-Michel, Xavier et Bernard et tous les autres sans qui l'expérience au cœur de cette étude n'aurait pas pu être menée à bien.

Enfin, les dernières lignes sont pour ceux qui ont partagé ma vie quotidienne tout au long de ces trois dernières années, notamment Claire-Isabelle, toujours à l'écoute ainsi que tous les autres doctorants et stagiaires du département pour ces moments d'échanges et de complicité me laissant d'excellents souvenirs.



# Table des matières

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>I. Etat de l'art.....</b>	<b>5</b>
I.1. Comportement des matériaux composites en fatigue .....	6
I.1.1. Endommagement des matériaux composites .....	6
I.1.2. Fatigue des matériaux composites .....	8
I.2. Contrôles non destructifs appliqués à la caractérisation de l'endommagement .....	12
I.2.1. Shearographie .....	12
I.2.2. Courants de Foucault .....	13
I.2.3. Téraherz .....	15
I.2.4. Acoustique non linéaire .....	16
I.2.5. Radiographie et micro-tomographie aux rayons X.....	17
I.2.5.1. Radiographie aux rayons X .....	17
I.2.5.2. Micro-tomographie aux rayons X.....	18
I.2.6. Résistivité électrique.....	19
I.2.7. Emission acoustique.....	21
I.2.7.1. Détection de l'endommagement .....	22
I.2.7.2. Localisation des évènements acoustiques .....	24
I.2.8. Thermographie infrarouge.....	25
I.2.8.1. Thermographie passive .....	25
I.2.8.2. Thermographie active.....	29
I.2.9. Corrélation d'images numériques .....	31
I.2.10. Ultrasons .....	34
I.2.10.1. Ondes de volume .....	35
I.2.10.2. Ondes de Lamb .....	38
I.2.11. Approche multi-technique non destructives .....	40
I.2.12. Bilan.....	43
I.3. Traitement et fusion des données .....	45
I.3.1. Analyse des composantes principales .....	45
I.3.2. Méthodes déterministes pour la fusion de données.....	47
I.3.2.1. Fusions de données conventionnelles.....	48
I.3.2.2. Modélisation de Dempster-Shafer .....	49
I.3.2.3. Application à l'endommagement des composites .....	50
I.3.3. Méthodes indéterministes pour la fusion de données.....	51
I.3.3.1. Méthodes pour l'estimation de la durée de vie résiduelle .....	52
I.3.3.2. Réseaux de neurones pour l'évaluation de l'endommagement .....	52
I.3.4. Bilan.....	55
I.4. Conclusion.....	56
<b>II. Matériau et méthodes expérimentales.....</b>	<b>58</b>
II.1. Caractérisation du matériau composite .....	59
II.1.1. Elaboration.....	59
II.1.2. Propriétés physiques et mécaniques du matériau composite .....	61

II.2. Conception des bancs expérimentaux.....	63
II.2.1.  Enceinte d'isolation in-situ.....	63
II.2.2.  Amélioration du système C-scan ultrasonore.....	64
II.3. Réalisation des essais multi-instrumentés.....	66
II.3.1.  Essais d'auto-échauffement en fatigue .....	66
II.3.2.  Protocole de mesures multi-techniques.....	67
II.4. Méthodes non destructives utilisées.....	69
II.4.1.  Thermographie infrarouge.....	69
II.4.1.1.  Dispositif expérimental.....	69
II.4.1.2.  Fonction de régression thermique sur un bloc de fatigue .....	70
II.4.2.  Corrélation d'images numériques .....	73
II.4.2.1.  Dispositif expérimental.....	73
II.4.2.2.  Calcul de l'aire l'hystérésis.....	75
II.4.2.3.  Sélection des paramètres pertinents .....	76
II.4.3.  Acousto-ultrasons .....	77
II.4.3.1.  Maillage de la zone d'intérêt.....	77
II.4.3.2.  Génération de sources acoustiques artificielles.....	78
II.4.3.3.  Interpolation numérique des cartographies acousto-ultrasonores.....	79
II.4.3.4.  Fusion des cartographies de chaque capteur.....	80
II.4.4.  Emission acoustique.....	81
II.4.4.1.  Dispositif expérimental et définition des descripteurs acoustiques.....	81
II.4.4.2.  Choix des capteurs.....	83
II.4.4.3.  Paramètres d'acquisition des salves.....	84
II.4.4.4.  Protocole de localisation des sources acoustiques .....	85
II.4.5.  Caractérisation ultrasonore dans l'épaisseur .....	88
II.4.6.  Ondes de Lamb sous chargement mécanique statique.....	89
II.5. Conclusion.....	90
<b>III. Evaluation de l'endommagement par techniques de contrôle non destructif .....</b>	<b>92</b>
III.1. Thermographie infrarouge passive.....	93
III.1.1.  Températures de stabilisation .....	93
III.1.2.  Mode fondamental de la régression.....	95
III.1.2.1.  Amplitude thermique du mode fondamental .....	95
III.1.2.2.  Phase du mode fondamental .....	97
III.1.3.  Amplitude de la première harmonique .....	98
III.1.4.  Bilan.....	100
III.2. Corrélation d'images numériques .....	100
III.2.1.  Caractérisation de l'hystérésis.....	101
III.2.1.1.  Cycles d'hystérésis.....	101
III.2.1.2.  Aire de l'hystérésis à l'échelle de l'image.....	102
III.2.1.3.  Exploitation à l'échelle du mm <sup>2</sup> .....	104
III.2.2.  Déformations dans le sens longitudinal.....	105
III.2.3.  Déformations principales.....	107
III.2.3.1.  Première déformation principale « e <sub>1</sub> ».....	107
III.2.3.2.  Seconde déformation principale « e <sub>2</sub> ».....	109



<b>Conclusion générale</b> .....	<b>158</b>
<b>Annexes</b> .....	<b>162</b>
A.    Méthode d'interpolation des données .....	163
B.    Méthodologie d'analyse des résultats en corrélation d'images numériques .	163
C.    Rappels sur les réseaux de neurones .....	164
D.    Méthodologie d'entraînement des réseaux de neurones en émission acoustique.....	166
E.    Méthode de fusion des acousto-ultrasons .....	168
F.    Mise en forme de la fonction d'interpolation en thermographie infrarouge .	168
G.    Méthode d'interpolation en thermographie passive .....	171
H.    Méthode de fusion des données.....	171
<b>Tables des figures et tableaux</b> .....	<b>172</b>
Table des figures .....	173
Table des tableaux .....	176
<b>Bibliographie</b> .....	<b>177</b>

# **Introduction générale**

Les matériaux composites à fibres continues et matrice polymère possèdent des propriétés intrinsèques leur conférant de nombreux avantages structurels et fonctionnels : légèreté, résistance mécanique en statique et en fatigue, liberté de formes... Ces propriétés sont particulièrement recherchées dans l'industrie, surtout dans le domaine des transports (aéronautique, aérospatial, ferroviaire, naval, automobile).

L'endommagement mécanique de ces matériaux est un phénomène complexe dont la caractérisation expérimentale est loin d'être maîtrisée malgré l'abondance des études menées sur ce sujet depuis plusieurs décennies. Cette complexité provient de la nature même du matériau qui est multicouche, hétérogène et anisotrope. En effet, l'endommagement peut être généré à toutes les échelles du matériau : microscopique, voire nanométrique, dans le cas de la rupture de la matrice, des fibres et de l'interface fibre/matrice, mésoscopique et macroscopique pour le délaminage. Ces mécanismes d'endommagement évoluent et se combinent au cours du temps, et peuvent être à l'origine de la ruine prématurée d'une structure. La complexité de ce phénomène et l'absence de méthode de référence permettant une caractérisation non destructive fine, fiable et complète allant jusqu'au pronostic de la durée de vie résiduelle du matériau, motivent l'engagement de ces travaux de recherche qui visent à apporter des éléments de réponses à ces problématiques. En effet, plusieurs techniques de caractérisation de l'endommagement existent, dont certaines sont fines et fiables (fractographie, tomographie aux rayons X) mais destructives, tandis que d'autres sont non destructives mais peuvent manquer de finesse et de fiabilité s'agissant des matériaux composites (émission acoustique, ultrasons, thermographie infrarouge...).

Ainsi, nous proposons ici une nouvelle approche de caractérisation basée sur l'utilisation de plusieurs techniques de contrôle non destructif (CND) et la fusion de leurs données complémentaires et/ou redondantes. La finalité est l'amélioration du diagnostic de l'état de santé des matériaux composites, sous sollicitation mécanique de fatigue, et le pronostic de leur durée de vie résiduelle. Pour ce faire, seront développées et mises en œuvre différentes techniques non destructives (émission acoustique, thermographie infrarouge, corrélation d'images numériques, ultrasons et acousto-ultrasons) in- ou ex-situ, en temps réel ou différé, pour analyser l'endommagement d'un matériau composite aéronautique

carbone/époxy soumis à des sollicitations d'auto-échauffement en fatigue (succession de blocs de charge croissante).

Plusieurs méthodologies innovantes seront mises en œuvre pour extraire un maximum d'indications des différentes techniques CND utilisées. Dans le cas de l'émission acoustique, l'analyse des données sera approfondie, via les réseaux de neurones, pour obtenir une localisation des événements acoustiques en deux dimensions avec l'utilisation de seulement deux capteurs. Classiquement, ce type de localisation nécessite l'utilisation de plusieurs capteurs (trois au minimum). Un des intérêts majeurs de cette localisation 2D est l'obtention de cartographies d'évènements acoustiques pouvant servir, par la suite, à la fusion de données. La thermographie infrarouge passive sera appliquée pour caractériser le comportement thermomécanique du matériau (domaine transitoire, permanent et thermoélastique). La mise au point d'une fonction de régression, prenant en compte ces trois domaines, permettra de générer des cartographies indiquant les seuils et les foyers d'endommagement du matériau. Les mesures des champs de déformations par corrélation d'images numériques seront exploitées de deux manières différentes, à savoir l'analyse des concentrations de contraintes et l'analyse des cycles d'hystérésis permettant l'estimation de la limite d'endurance du matériau par analogie avec la méthode des températures stabilisées en thermographie infrarouge. Les ultrasons seront utilisés sous trois formes différentes, en ondes de volume (C-Scan), en ondes guidées (onde de Lamb) et en acousto-ultrasons. Pour cette dernière variante, une méthodologie inédite sera présentée permettant la localisation et le suivi, hors contraintes, des micro-endommagements créés dans le matériau (ce qui ne pouvait se réaliser jusqu'ici que sous contraintes par émission acoustique).

Parmi ces méthodologies novatrices figure également l'analyse des données mise en œuvre. En effet, les réseaux de neurones seront largement utilisés pour le traitement des données de certaines techniques non destructives, comme l'émission acoustique, les acousto-ultrasons..., mais aussi pour leur fusion à l'aide de différentes stratégies (fusion intra- et inter-techniques de niveau haut et intermédiaire). Le but de ces traitements est l'amélioration du diagnostic de l'état de santé du matériau et la prédiction de sa durée de vie résiduelle.

Le premier chapitre du manuscrit est consacré à une étude bibliographique sur l'endommagement mécanique par fatigue des matériaux composites et les méthodes de contrôle non destructif utilisées pour sa caractérisation. Les méthodes de fusion de données utilisées dans la littérature seront également abordées.

Le deuxième chapitre traite de l'élaboration et de la caractérisation du matériau d'étude, de la réalisation des dispositifs expérimentaux, et explicite les différents paramètres et indicateurs d'endommagement traités par la suite.

Le troisième chapitre se focalise sur les résultats obtenus, technique par technique, en mettant l'accent sur les intérêts et les limites de chaque indicateur d'endommagement, et en les présentant, dans la mesure du possible, sous formes d'images pour servir à la fusion de données.

Le dernier chapitre s'attache enfin à mettre en œuvre la fusion de données. Le choix des réseaux de neurones artificiels pour effectuer la fusion sera justifié et différentes stratégies de fusion seront explorées. La procédure et les résultats du pronostic de la durée de vie résiduelle du matériau seront in fine explicités.

## **I. Etat de l'art**

Différents mécanismes d'endommagement apparaissent et se développent au sein des matériaux composites à matrice polymère soumis à une sollicitation mécanique. L'évaluation de l'endommagement peut être effectuée à l'aide de techniques de contrôle non destructif : thermographie infrarouge, émission acoustique, corrélation d'images numériques, ultrasons, tomographie, piézorésistivité, térahertz, courants de Foucault ... Chaque technique possède des limitations en termes d'évaluation ou de localisation de l'endommagement. Suivant les cas, la caractérisation peut, par exemple, être réalisée en surface ou dans l'épaisseur. Afin d'estimer l'endommagement le plus complètement possible, la combinaison de plusieurs techniques permet d'établir un diagnostic plus fiable et précis de la dégradation du matériau.

La mise en œuvre de multiples contrôles non destructifs nécessite une gestion efficace des données enregistrées en raison du nombre important d'informations disponibles. De plus, ces données présentent des caractéristiques hétérogènes (caractéristiques d'ondes, températures, vitesses, ...). Afin de résoudre cette problématique, sans pour autant biaiser l'estimation de l'endommagement, une approche consiste en la fusion de données pour l'évaluation de l'état de santé du matériau et de sa durée de vie résiduelle. Cette stratégie peut être appliquée avec des théories conventionnelles ou des approches plus avancées en classification ou en régression des données. La fusion de données peut également être utilisée au niveau des paramètres de chaque technique.

Après un bref rappel relatif au comportement et à l'endommagement des matériaux composites en fatigue, ce chapitre présente l'état de l'art en matière de techniques de contrôle non destructif applicables pour caractériser leur intégrité structurale et de méthodes de traitement et de fusion de données.

## **I.1. Comportement des matériaux composites en fatigue**

### **I.1.1. Endommagement des matériaux composites**

Un matériau composite est composé de deux phases distinctes : le renfort, généralement des fibres (coupées, longues, courtes ou continues), et la matrice. Dans le cas de fibres continues, une ou plusieurs directions préférentielles peuvent être introduites dans le

matériau (anisotropie). A contrario, une distribution aléatoire de l'orientation de fibres coupées fait que le matériau présente un comportement isotrope au niveau macroscopique. Les fibres supportent les efforts mécaniques auxquels le matériau est soumis. La matrice assure la transmission des efforts entre les fibres et joue un rôle protecteur face à l'environnement. La performance du matériau dépend fortement de l'interface entre ces deux éléments constitutifs du composite.

Un tel matériau hétérogène est susceptible de s'endommager via des mécanismes complexes et dynamiques qui se développent durant la vie des structures. Le cycle de vie d'un composite sollicité en fatigue est schématisé à la figure I-1.

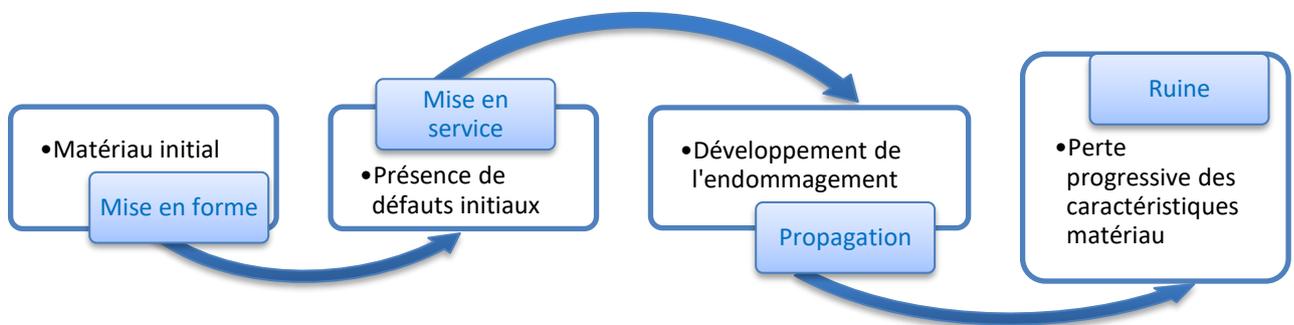


figure I-1 : Evolution de l'endommagement d'un composite sous chargement de fatigue

Généralement, quatre mécanismes d'endommagement sont identifiés durant le cycle de vie des matériaux composites :

- **La fissuration matricielle** : elle a pour origine la faible résistance de la matrice ou peut être générée à partir d'interfaces fibre/matrice médiocres ainsi que d'inclusions/porosités préexistantes dans le matériau. De nombreux paramètres contrôlent la propagation des fissures comme la quantité des fibres, l'épaisseur des différents plis ou la qualité de l'interface.
- **La décohésion fibre/matrice** : la propagation des microfissures dépend de la qualité de l'interface. Si elle est résistante, les fibres peuvent contenir la fissuration mais les contraintes sur cette phase augmentent. Cela produit la rupture des fibres. Il en résulte un faciès de rupture fragile. Dans le cas d'une interface médiocre, la fissuration contourne les fibres qui ne se brisent pas et le faciès de rupture est plus ductile [1].

- **La rupture des fibres** : les fibres étant l'élément le plus résistant du matériau, ce mécanisme requiert une contrainte particulièrement élevée afin de générer leur défaillance conduisant alors à la ruine du matériau. Certaines fibres peuvent également rompre précocement si elles présentent un défaut ou un désalignement par rapport à la direction de sollicitation mécanique [2].
- **Le délaminage** : aussi appelé fissuration inter-laminaire ou décohésion inter-ply, cet endommagement macroscopique est lié à l'anisotropie entre les différents plis. Il s'amorce dans les zones ayant les plus forts gradients de contraintes (bords libres) et provoque la décohésion entre les différents plis du stratifié.

Ces différents mécanismes d'endommagement dépendent aussi du type de chargement mécanique appliqué. La ruine finale du matériau résulte de l'apparition d'un ou plusieurs de ces mécanismes [3]. La sollicitation en traction d'un empilement unidirectionnel favorise la ruine par rupture des fibres, alors que la sollicitation transversale génère de la décohésion et du délaminage.

Ces mécanismes d'endommagement sont généraux. Ils peuvent être identifiés lors d'essais statiques (en traction ou en flexion) ou encore durant des campagnes de fatigue.

### **I.1.2. Fatigue des matériaux composites**

Lors d'un essai de fatigue, le scénario d'évolution de l'endommagement dépend des constituants du composite (fibre, matrice) et de la charge mécanique appliquée (niveau de contrainte de la séquence de chargement, rapport de contraintes) [4, 5]. Dans le cas particulier de la fatigue mécanique, de nombreux protocoles de caractérisation à l'échelle du laboratoire ont été développés pour la détection des foyers d'endommagement et l'examen de leurs cinétiques d'évolution. Un choix approprié des techniques de contrôle non destructif est nécessaire pour détecter sans ambiguïté les endommagements mécaniques se produisant dans le composite.

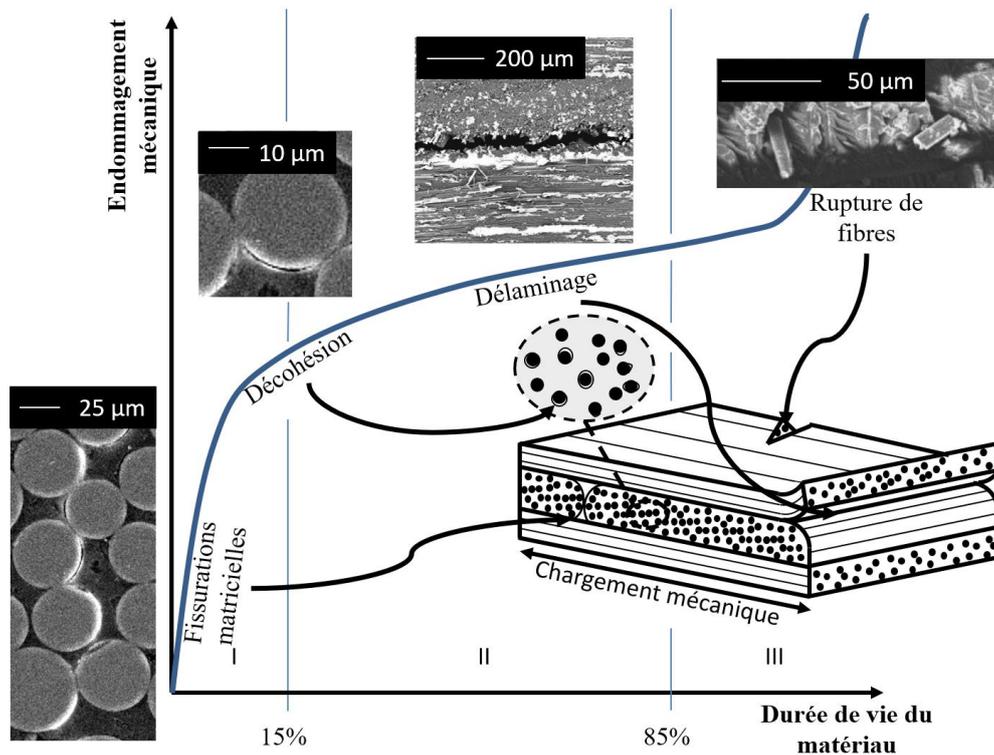
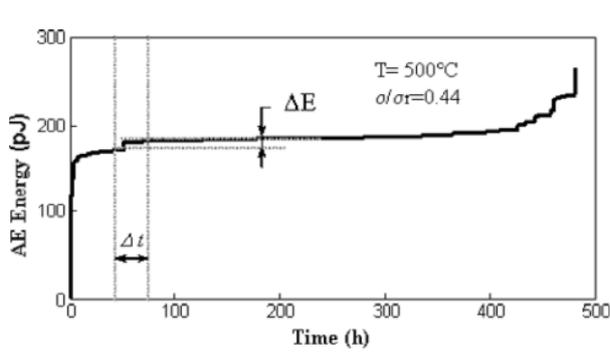


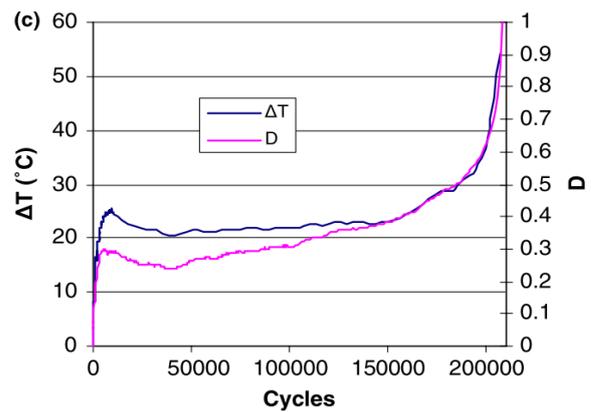
figure I-2 : Différentes phases de l'endommagement d'un composite stratifié en fatigue (adapté d'après [6])

Le scénario d'évolution global de l'endommagement au cours du cycle de vie en fatigue mécanique est généralement composé de trois étapes principales [7, 8] (figure I-2). Basé sur l'évolution de la rigidité normalisée du matériau en fonction du temps, ce scénario d'évolution est commun aux composites structuraux à matrice polymère quel que soit le type de fibre (carbone, verre ...). La première étape (I) est développée pendant les premiers 15% de la vie du composite et se caractérise par une diminution rapide de la rigidité correspondant à la mise en service de la pièce composite considérée. La deuxième étape (II) est quasi-stable avec une évolution de l'endommagement plus lente dégradant progressivement la rigidité du matériau. La dernière étape (III) est marquée par une chute de la rigidité normalisée conduisant à la rupture (5 à 15% de la vie totale du composite). Ce scénario repose sur une analyse macroscopique des caractéristiques du matériau, ce qui est limitatif étant donnée la propagation multi-échelle de l'endommagement au sein des composites.

Cette évolution de l'endommagement sous chargement de fatigue est identifiable au moyen de différentes techniques de contrôle non destructif, telles que l'émission acoustique ou la thermographie infrarouge (figure I-3).



(a) Capacité des émissions acoustiques pour le suivi de l'endommagement [9]



(b) Thermographie infrarouge pour le suivi de l'endommagement [10]

figure I-3 : Evaluation des différentes phases de l'endommagement des composites à l'aide de techniques non destructives

La limite d'endurance est une caractéristique utilisée pour le dimensionnement des structures en fatigue. Il s'agit de la contrainte pour laquelle on considère que la pièce ne cassera pas en fatigue. La durée de vie est alors estimée « infinie ». L'analyse classiquement menée afin de déterminer cette limite est la construction de la courbe de Wöhler (contrainte maximale appliquée en fonction du nombre de cycles de sollicitation mécanique).

La détermination expérimentale de la courbe de Wöhler est chronophage et coûteuse considérant le nombre d'échantillons utilisés. Afin de pallier ce problème, les essais d'auto-échauffement [11] permettent une détermination plus rapide de la résistance en fatigue. Cette méthode repose sur la quantité de chaleur dissipée par le matériau soumis à des blocs de contrainte croissante. Pour une contrainte donnée, la température du matériau se stabilise après un certain nombre de cycles. Il est alors possible de représenter ces températures de stabilisation en fonction de la contrainte appliquée. Deux comportements linéaires sont identifiables. L'intersection de ces domaines permet de déterminer la limite d'endurance (figure I-4).

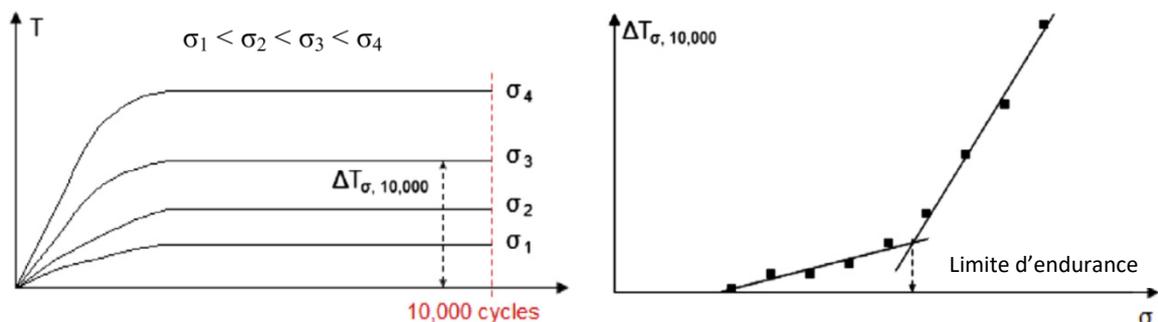


figure I-4 : Détermination de la résistance en fatigue par essais d'auto-échauffement [8]

Lors d'un essai de fatigue, le matériau est sollicité de façon cyclique introduisant un effet thermoélastique en son sein. Ces fluctuations à l'échelle des cycles mécaniques doivent être évaluées afin d'interpréter précisément l'augmentation de température induite par l'endommagement (figure I-5). Bien que ces techniques aient été développées pour les matériaux métalliques, elles sont aussi appliquées dans le cas des matériaux composites, notamment les composites à fibre de carbone, pour déterminer la limite d'endurance [12].

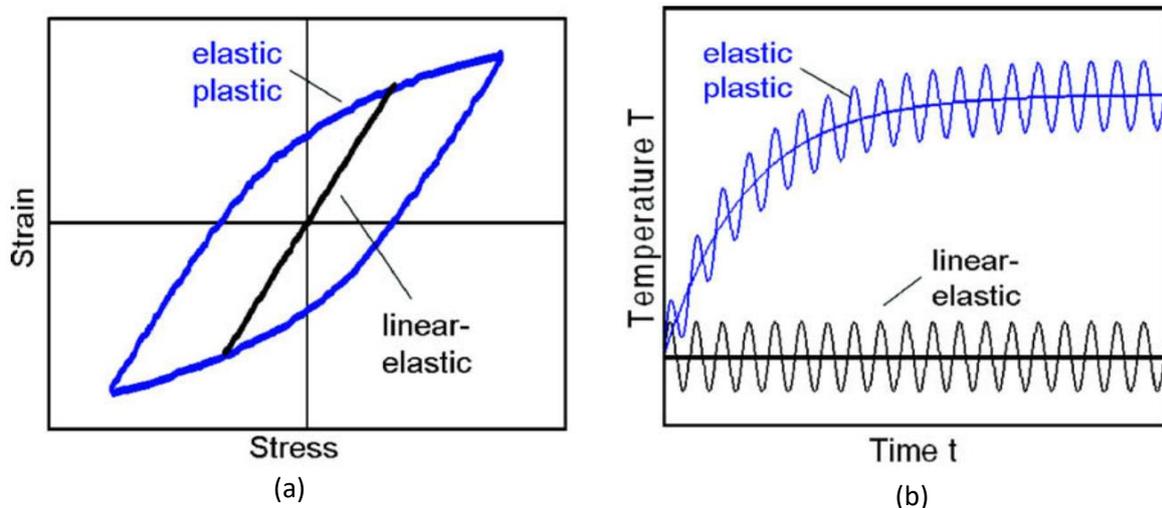


figure I-5 : (a) Loi de comportement mécanique et (b) température d'un matériau sollicité en fatigue dynamique [13]

L'endommagement en fatigue est également évalué par la dégradation des caractéristiques mécaniques du matériau (évolution des rigidités). Le suivi de plusieurs paramètres définis à partir des caractéristiques mécaniques surfaciques et dans l'épaisseur a permis une évaluation pertinente de l'endommagement de composites à fibre de verre. Cette analyse multi-paramétrique [14], met en lumière la nécessité de paramètres d'endommagement sophistiqués pour une évaluation fiable de la dégradation des composites. Ces résultats sont d'autant plus précis que les caractéristiques mécaniques utilisées sont nombreuses et complémentaires.

La rigidité résiduelle est un indicateur extrêmement fiable pour les matériaux métalliques mais présente quelques limitations dans le cas des composites. D'autres paramètres ont donc été introduits, notamment à l'aide de techniques non destructives (émission acoustique [15], thermographie infrarouge, ou corrélation d'images numériques [16]).

En conclusion, l'endommagement mécanique des composites est un phénomène complexe faisant intervenir différents mécanismes. Afin d'évaluer son impact sur l'intégrité des

structures composites, des indicateurs d'endommagement hérités des matériaux métalliques ont été utilisés. Cependant, ceux-ci ne permettent pas la prise en compte de l'ensemble des spécificités de l'endommagement tels que l'anisotropie ou la dégradation aux différentes échelles du matériau. A cette fin, les techniques de contrôle non destructif sont intéressantes dans la mesure où elles permettent la caractérisation sans dégradation supplémentaire de la structure. Les indicateurs d'endommagement établis à l'aide de ces méthodes sont susceptibles d'améliorer le diagnostic de l'état de santé du matériau.

## **I.2. Contrôles non destructifs appliqués à la caractérisation de l'endommagement**

Cette partie présente les avancées récentes relatives à l'évaluation de l'endommagement des composites à matrice polymère à l'aide de contrôles non destructifs. Plusieurs techniques peuvent être utilisées selon que l'on souhaite évaluer l'endommagement lorsque la pièce est soumise à une charge mécanique (essai in-situ) ou dans un cas libre de charge mécanique pour une analyse périodique (essai ex-situ).

Une description exhaustive de l'ensemble des techniques non destructives est hors de propos au regard de leur nombre important. Cette synthèse bibliographique se limitera à rappeler le principe des techniques les plus pertinentes pour caractériser et localiser l'endommagement, surfacique ou dans l'épaisseur suivant la méthode considérée : shearographie, courants de Foucault, térahertz, ultrasons basés sur les effets non-linéaires, radiographie,  $\mu$ -tomographie, piézorésistivité, émission acoustique, thermographie infrarouge, corrélation d'images numériques et ultrasons conventionnels. L'intérêt d'une approche hybride multi-technique pour évaluer au mieux l'endommagement sera enfin mis en exergue.

### **I.2.1. Shearographie**

La shearographie est une méthode optique basée sur l'interférométrie holographique. Son application classique requiert l'utilisation de lasers [17]. Les résultats présentent, sous forme d'images qualitatives à grandes échelles, les variations de déplacement de la surface d'une

structure (variation dans le plan et hors-plan). Cette méthode a été développée dans l'industrie aéronautique pour évaluer les pièces composites.

La détérioration des composites étant corrélée avec les zones de fortes concentrations de contraintes, la shearographie est utilisée pour détecter la décohésion fibre/matrice ou l'amorçage du délaminage [18-24]. La shearographie numérique par stimulation laser a été utilisée pour détecter et localiser des défauts artificiels calibrés (diamètres de 15 à 40mm et profondeurs de 1 à 3.2mm) dans des stratifiés de 4 mm d'épaisseur  $[0, \pm 45, 90]_s$  [19]. Les résultats obtenus présentent une bonne corrélation entre la taille et l'emplacement réels des défauts. Ce type de mesures reste limité aux mécanismes d'endommagement surfacique ou sous-surfacique.

La détection du délaminage par shearographie a été fortement améliorée en une analyse neuronale (basée sur des réseaux de neurones et de la logique floue) sur 30 échantillons du même matériau composite (erreur obtenue inférieure à 3%) [25]. Généralement, ce type d'analyse nécessite beaucoup plus de données pour atteindre cette précision.

La localisation de l'endommagement par shearographie peut également être améliorée en utilisant un éclairage laser à double impulsion (modulation de phase spatiale) et un laser stroboscopique (modulation de phase temporelle) [26]. Les deux méthodes d'excitation sont utilisées pour la détection du délaminage, les résultats les plus pertinents étant obtenus dans le second cas en raison de la réduction du bruit avec les cartographies de modulation de phase temporelle.

L'inconvénient majeur de la shearographie reste la complexité de caractérisation de la rupture des fibres, de la fissuration matricielle ou de la décohésion fibre/matrice (c'est-à-dire des mécanismes d'endommagement microscopiques à mésoscopiques). De plus, son application en conditions industrielles reste difficile en raison de sa sensibilité aux perturbations environnantes [27] et de sa limitation à la surface des pièces évaluées.

## **I.2.2. Courants de Foucault**

La méthode des courants de Foucault est la plus connue parmi celles basées sur l'induction électromagnétique pour détecter et caractériser les défauts de surface et sous-surfaciques dans les matériaux conducteurs. Pour les matériaux composites à fibre de carbone, cette

technique a été utilisée pour évaluer la densité de conductivité électrique à la surface du matériau étudié [28]. Ces données et la séquence d'empilement permettent de générer un réseau de résistance du matériau. L'identification de l'anisotropie du matériau est alors mise en évidence.

Les endommagements tel que le délaminage peuvent être évalués en suivant les variations d'impédances entre les zones intactes et les zones les plus endommagées [29]. Cependant, la nécessité de matériaux conducteurs limite également l'inspection en profondeur des pièces à caractériser. Ainsi, le délaminage dans l'épaisseur n'est pas facilement détectable par courants de Foucault à moins qu'il ne modifie de manière significative la conductivité inter-couches. Même dans ce cas, le délaminage peut être sous-estimé en raison de l'atténuation du matériau limitant la profondeur de détection à quelques millimètres [30, 31].

Une utilisation moins conventionnelle de cette méthode pour la détection du délaminage consiste à utiliser les courants de Foucault comme source de chaleur interne pour la méthode de thermographie active appliquée aux composites [31-34].

La variation d'impédance a également été utilisée pour la détection de désalignement de fibres [35, 36]. Dans ce cas, un modèle numérique a été mis en œuvre pour identifier la présence d'une désorientation angulaire d'une mèche au sein d'un pli. Cependant des différences apparaissent entre les résultats expérimentaux et numériques conduisant à une sous-estimation des propriétés du matériau. Une caractérisation de la désorientation du renfort a été réalisée plus efficacement en utilisant une nouvelle sonde circulaire, composée de plusieurs bobines disposées en cercle, fournissant instantanément un diagramme polaire de l'impédance dans le plan pour la détection de cet endommagement [37].

Les courants de Foucault ont aussi été utilisés pour estimer l'état d'endommagement lors de la production de plaques de composites à fibre de carbone [38]. Cette caractérisation est réalisée à l'état initial et durant l'utilisation en service pour la détection de la rupture des fibres [29, 39].

Cette méthode permet donc d'évaluer des endommagements comme le délaminage ou la rupture de fibres proches de la surface. Néanmoins, l'utilisation d'ondes électromagnétiques réduit les possibilités d'évaluation aux seuls matériaux conducteurs.

### **I.2.3. Téraherz**

Le développement de sources téraherz a permis la production d'impulsions extrêmement courtes (de l'ordre de la picoseconde). Elles sont requises pour générer une fréquence de 0.1 à 4THz ( $10^{12}$ Hz), permettant une résolution plus élevée (théoriquement de l'ordre du nm) que les inspections réalisées en utilisant des micro-ondes (précision de l'ordre du mm) [40]. L'une des applications téraherz les plus connues consiste à utiliser un laser femtoseconde infrarouge, dont les impulsions sont focalisées sur un commutateur photoconducteur générant le rayonnement THz et agissant comme une antenne. Le rayonnement téraherz est ensuite focalisé sur l'échantillon par des lentilles ou des miroirs concaves. La réception des impulsions est effectuée de manière symétrique. Appliquée en tant que méthode non destructive sur les matériaux composites à fibres de verre, elle permet d'identifier les changements de la fraction volumique des fibres dans les échantillons [41].

Majoritairement, les études utilisent le mode réflexion pour détecter le délaminage [42]. Dans ce cas, la précision est élevée (0.1  $\mu$ m) dans la direction de l'épaisseur de l'échantillon et permet l'évaluation de l'endommagement induit par le mécanisme de délaminage. Ainsi, la détection de fissures dans une mousse de 101 mm d'épaisseur par les téraherz démontre l'efficacité des résultats d'inspection de cette méthode en comparaison de l'inspection visuelle du panneau [43].

La majorité des études est focalisée sur les ondes téraherz à fréquence unique. Cependant, la spectroscopie dans le domaine temporel est également envisageable avec cette technique. Cette approche a été utilisée pour évaluer un nouveau modèle de comportement diélectrique de matériaux composites à fibre de verre [44] ou encore pour la détection de l'endommagement sur la surface extérieure de pièces aéronautiques [45, 46].

La pénétration à travers les fibres de carbone est encore limitée (1 mm en profondeur dans le meilleur des cas [40, 47]), en raison de leur conductivité électrique élevée. Jusqu'à présent, les inspections téraherz ne sont pas applicables sur la grande majorité des

structures composites et restent limitées aux applications de laboratoire. Cela est principalement dû au temps de balayage relativement long par rapport à la zone d'observation. Le cas des matériaux non conducteurs où la détection de l'endommagement est limitée à la surface et aux zones sous-surfaciques est également limitant.

#### **I.2.4. Acoustique non linéaire**

La propagation des ondes ultrasonores dans les matériaux composites est un phénomène complexe (atténuation, dispersion et bruit). Les méthodes acoustiques non linéaires, actuellement utilisées en laboratoire, offrent une alternative intéressante pour caractériser l'endommagement dans ces matériaux sans nécessiter l'utilisation d'ondes demandant des conditions expérimentales particulières en termes de fréquence et d'énergie de sollicitation.

La caractérisation de l'endommagement par des méthodes acoustiques non linéaires peut être divisée en deux groupes. Le premier est basé sur la théorie de l'élasticité non linéaire. Les non linéarités sont liées au comportement mécanique en « contrainte-déformation » du matériau (développé au troisième ordre d'élasticité) pour le chargement statique et dynamique ou l'anharmonicité atomique (par exemple, les non linéarités cubiques et quadratiques) [48-50].

Le second groupe de méthodes non linéaires exploite le comportement dissipatif du matériau généré par l'endommagement microscopique. Dans ce cas, les spectres de réponse contiennent des composantes supplémentaires telles que des harmoniques plus élevées et des sous-harmoniques. Différentes techniques sont basées sur cet effet non linéaire, à savoir la non linéarité acoustique de contact (CAN) [51, 52], les modulations d'ondes vibro-acoustiques [53-55], le transfert de modulation [56, 57] ou encore l'effet mémoire [58]. La spectroscopie élastique non linéaire est fréquemment couplée au traitement du signal de retournement temporel pour localiser les sources d'endommagement [59-61].

Plus récemment, la technique de résonance locale des défauts (LDR) présente des perspectives intéressantes en termes de localisation de l'endommagement [62-64]. Cette méthode génère des vibrations au niveau des zones endommagées permettant leurs localisations.

Enfin, l'endommagement par impact macroscopique (de l'ordre du cm) à différentes énergies de plaques stratifiées carbone/époxy a été évalué par une technique de modulation d'ondes vibro-acoustiques basée sur la combinaison de deux fréquences d'excitation: une fréquence élevée de quelques dizaines de kHz et le mode fondamental de la structure [65]. Pour un matériau sain, la haute fréquence apparaît seule sans harmoniques complémentaires (figure I-6a). A l'inverse, si le matériau est endommagé, des harmoniques mixtes des deux fréquences d'excitation apparaissent autour de la fréquence haute avec une diminution de l'amplitude spectrale du pic principal en fonction du niveau d'endommagement (figure I-6b).

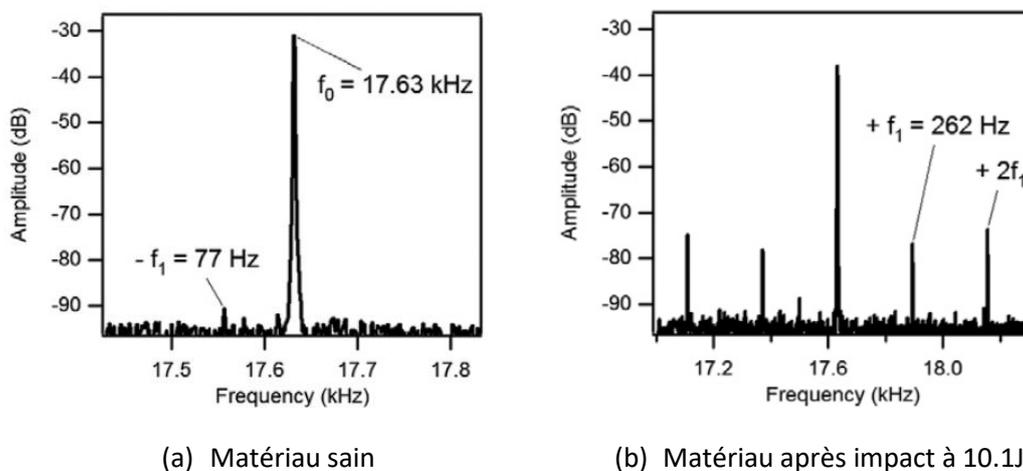


figure I-6 : Transfert de modulation sur un composite à fibres de carbone entre  
(a) l'état de référence et (b) l'état après impact [65]

## I.2.5. Radiographie et micro-tomographie aux rayons X

### I.2.5.1. Radiographie aux rayons X

La radiographie conventionnelle utilise un faisceau de rayons X pour sonder la structure interne des matériaux étudiés. La projection du faisceau sur un film sensible aux rayons X ou un scanner numérique forme une image 2D (appelée radiographie X). La radiographie X représente une cartographie de l'atténuation des rayons X causée par les changements de densité dans la direction du faisceau. La radiographie à basse tension est utilisée pour les pièces minces (dont l'épaisseur est inférieure à 5 mm), tandis que la radiographie à rayons gamma est appropriée pour les pièces plus épaisses.

Cette radiographie a été utilisée pour détecter les endommagements aux échelles mésoscopiques et macroscopiques dans les composites ; tels que les fissures inter-laminaires et le délaminage [66]. Elle permet également de détecter des fissures évoluant dans le plan transversal à la direction du faisceau [67]. La détection des porosités débouchantes à la surface du matériau a été réalisée en appliquant un produit de contraste avant l'inspection permettant la détection de fissurations matricielles [68]. Cette méthode a aussi été appliquée afin de surveiller l'amorçage et la propagation de la fissuration de la matrice dans des stratifiés à fibres de carbone soumis à un chargement de fatigue en traction [69].

#### **I.2.5.2. Micro-tomographie aux rayons X**

La micro-tomographie aux rayons X ( $\mu$ CT) repose sur la reconstruction informatisée d'une série de radiographies X recueillie en faisant tourner l'échantillon à pas angulaire contrôlé. Les données de sortie correspondent à des cartographies 3D d'éléments de tailles caractéristiques (appelés voxels) codés en niveaux de gris. Les contrastes obtenus sur les radiogrammes correspondent aux variations des coefficients d'absorption linéaires des constituants du matériau (matrice/fibre/porosité par exemple).

Les configurations  $\mu$ CT expérimentales récentes (en laboratoire) permettent d'accéder à l'architecture 3D d'un matériau hétérogène avec un voxel de résolution sous-micrométrique. L'application de protocoles appropriés de post-traitement d'image (seuillage de niveau de gris, filtres géométriques, algorithmes de segmentation de fibre ...) permet la discrimination entre la matrice, les fibres et l'endommagement [70-73].

Ainsi, la  $\mu$ CT de laboratoire a été utilisée pour suivre l'évolution de l'endommagement dans un panneau d'interlock à fibre de verre soumis à un essai de fatigue en traction [74]. Dans ce cas, la résolution  $\mu$ CT utilisée (11.8 $\mu$ m) était trop grossière pour détecter les mécanismes de dégradations fins tels que la rupture des fibres. Cosmi et al. [75] ont caractérisé l'évolution des micro-fissures dans un matériau constitué de fibres de verre courtes et ont montré que l'amorçage de l'endommagement apparaît principalement dans les régions de forte densité locale de fibres. Rolland et al. [73] ont, quant à eux, effectué des essais de traction suivis à l'aide d'un synchrotron sur un matériau à fibres de verre avec une taille de voxel de 0.7 $\mu$ m. Les résultats obtenus permettent d'identifier l'amorçage de la décohésion aux extrémités des fibres, la rupture des fibres ainsi que la coalescence de la matrice. Cependant, cette

résolution spatiale n'était pas suffisamment fine pour détecter la formation des fissures matricielles. Enfin, le cas des composites à fibres de verre tissées en 3D a été étudié par Yu et al. [74, 76], qui ont utilisé la  $\mu$ CT en temps réel pour surveiller l'évolution de l'endommagement pendant un chargement en fatigue. L'amorçage des fissures transversales est apparu dès 0.1% de la durée de vie. La décohésion, quant à elle, n'était détectable qu'autour de 1% de la vie de l'échantillon. Une stabilisation des fissures transversales a été observée autour de 60% de la durée de vie du composite. L'endommagement dans les poches de résines ne devient détectable que dans un état proche de la rupture.

Les études précitées rapportent l'efficacité de la  $\mu$ CT pour étudier la propagation de l'endommagement dans les composites à fibre de verre. Cependant, certaines restrictions existent pour les matériaux à fibre de carbone en raison des nombres atomiques relativement proches entre la fibre et la matrice. Pour surmonter cette limite, il est possible d'ajouter un produit pénétrant au composite pour améliorer le contraste d'absorbance locale dans le cas de porosités débouchantes [77].

Au-delà, les travaux de Scott et al. [70] sont pionniers pour quantifier l'accumulation de ruptures de fibre. Cependant, la détection des endommagements n'était possible que pour des niveaux de chargements supérieurs à 30% de contrainte à rupture en raison de la taille de voxel utilisée (de 1,4  $\mu$ m).

En somme, le potentiel de haute résolution de la  $\mu$ CT est intéressant pour évaluer l'endommagement en 3D y compris dans l'épaisseur du matériau [78]. Néanmoins, des défis subsistent. Le coût élevé (configuration expérimentale et ressources logicielles) et la complexité des mesures rendent la réalisation de tels essais complexes. Enfin, si la  $\mu$ CT est présentée ici comme une technique non destructive, l'application à des structures réelles nécessite un échantillon de matériau, ce qui rend de fait cette méthode destructive.

### **I.2.6. Résistivité électrique**

Cette technique repose sur la variation de la résistivité du matériau. Elle est donc limitée aux seuls matériaux conducteurs. La réalisation de la mesure est délicate et influence fortement la qualité des résultats.

Suivant la qualité de l'interface entre l'électrode réalisant la mesure et l'éprouvette, des phénomènes résistifs antagonistes peuvent être identifiés [79]. La résistivité du matériau tend à augmenter avec la propagation de l'endommagement. Ce comportement peut être expliqué par la figure I-7. Lors de la mise en tension des fibres, les zones de contact électriques sont réduites augmentant ainsi la résistivité du matériau. La valeur de cette résistance dépend également de plusieurs paramètres, tels que la fraction volumique de la fibre, la séquence d'empilement et la direction de la mesure [80].

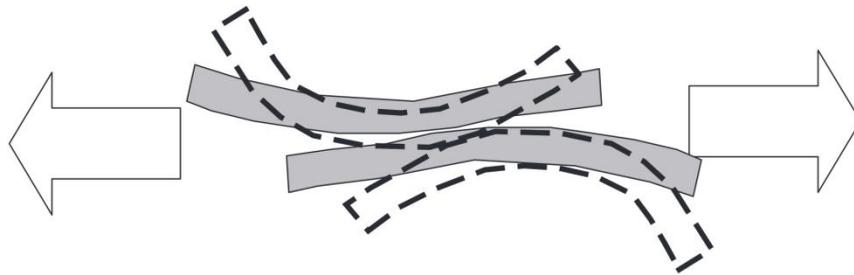


figure I-7 : Contact entre les fibres expliquant l'augmentation de la résistivité (en pointillé) avant chargement et (en plein) sous chargement [79]

L'état de dégradation d'un composite à fibres de carbone est corrélé à la résistance électrique du matériau, permettant ainsi une surveillance en temps réel de l'état de santé par mesure électrique. La mesure est classiquement réalisée à l'aide de feuilles de cuivre [81, 82] ou de peinture argentée [83, 84].

Connor et al. [85] ont employé du courant continu puis un courant alternatif à fréquence variable sur un composite à fibre de carbone. Dans le premier cas, le matériau présente le même comportement qu'une résistance. Lors de l'application du courant alternatif, l'utilisation d'une fréquence élevée (de l'ordre du MHz), en fonction de la fraction volumique de fibre du matériau, induit un comportement d'impédance (conductif et capacitif). Kupke et al. ont rapporté que la réponse en courant continu est plus efficace pour la détection de l'endommagement [84]. Le courant continu permet la détection de la rupture de fibre. Le courant alternatif est plus adapté au contrôle des fissures matricielles, au délaminage, à la décohésion fibre/matrice ou aux fissures transversales [86].

Cette méthode de suivi de la variation de la résistance électrique a été largement utilisée pour identifier les mécanismes d'endommagement des composites carbone comme le

délamination [87-89], la fissuration matricielle [90] et la rupture de fibres [79]. Ces endommagements peuvent être générés dans le matériau par un impact [91], un chargement mécanique statique [86, 92] ou un chargement mécanique de fatigue [82, 84, 92, 93].

Les applications de suivi de l'endommagement basées sur le principe de la mesure de la résistance électrique peuvent également être étendues à des matériaux non conducteurs en leur intégrant des mèches de carbone (ou autre matériau conducteur). L'avantage principal de cette méthode est la préservation des caractéristiques du matériau hôte [94, 95]. Cette approche a été utilisée avec succès sur des éprouvettes de composite à fibre de verre sollicitées en traction et sur des tubes soumis à une pression hydraulique interne [94, 95]. Cependant, la qualité des électrodes (nature du matériau et conditions de contact) reste le facteur déterminant pour effectuer des mesures précises.

### **I.2.7. Emission acoustique**

L'émission acoustique est historiquement considérée comme l'une des techniques les plus efficaces pour évaluer l'endommagement mécanique se développant dans les composites [2, 96]. Les émissions acoustiques sont des ondes élastiques transitoires, à des fréquences ultrasonores, provoquées par de micro-déplacements locaux internes à un matériau soumis à une sollicitation mécanique (norme NF EN 1330-9). Ces ondes transitoires se propagent concentriquement à partir de leur source et peuvent être détectées par des capteurs piézoélectriques. La chaîne d'acquisition typique de l'émission acoustique (figure I-8) est constituée de plusieurs éléments :

- Le capteur : premier élément de la chaîne, il est composé d'une pastille piézoélectrique permettant la conversion des ondes élastiques se propageant dans le matériau en courant électrique.
- Le pré-amplificateur : ce premier étage d'amplification situé au plus près de la source du signal a pour but de limiter la dégradation du signal et les interférences parasites en garantissant un bon rapport signal sur bruit.
- La centrale d'acquisition : cet élément assure l'acquisition et l'enregistrement numérique des événements acoustiques.

- L'affichage logiciel : l'onde et les paramètres associés sont calculés par le logiciel d'acquisition.

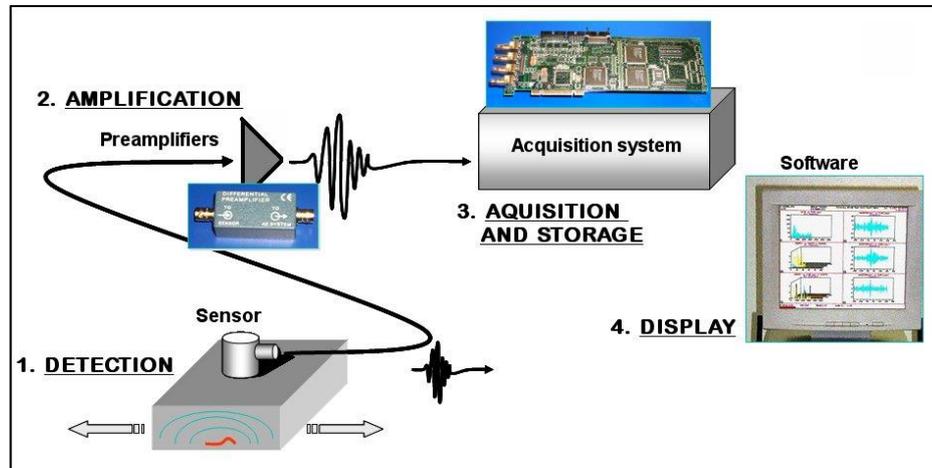


figure I-8 : Principe de l'émission acoustique

La norme NF A 09-350 définit les termes spécifiques aux émissions acoustiques. Une « salve » désigne un signal de forme oscillatoire caractérisé par une croissance rapide de l'amplitude à partir du bruit de fond puis une décroissance jusqu'à un retour à l'état initial. Un « évènement » acoustiques est, quant à lui, une onde élastique transitoire engendrant un micro-déplacement dans le matériau.

### I.2.7.1. Détection de l'endommagement

Le suivi des émissions acoustiques rend compte de l'évolution de l'endommagement des matériaux composites à l'aide de différents paramètres, tels que l'amplitude, le nombre d'évènements cumulés, l'énergie cumulée ou encore le spectre fréquentiel du signal [9, 97-103]. Les différents mécanismes d'endommagement peuvent être caractérisés à l'aide de ces paramètres. Ils correspondent à des signatures acoustiques spécifiques, dépendant du matériau et de la chaîne d'acquisition utilisée (bande de fréquence des capteurs, caractéristiques du préamplificateur, seuil d'acquisition, etc). Néanmoins, différentes analyses s'accordent pour identifier le délaminage et la rupture des fibres comme les mécanismes d'endommagement les plus énergétiques, contrairement aux fissurations matricielles [104-106].

Pour améliorer l'identification des différents types d'endommagement, il convient d'utiliser plusieurs paramètres pour la définition des signatures acoustiques. Une approche largement

mise en œuvre, consiste en une analyse des composantes principales, classiquement appliquée sur les métaux [107] puis sur les composites [108]. Cette analyse permet l'identification des paramètres les plus pertinents pour éviter toute redondance. L'utilisation d'un réseau de neurones artificiel à la suite de cette méthode numérique a permis l'identification des mécanismes d'endommagement et leur classification [108]. Les approches par réseaux de neurones nécessitent une grande quantité d'informations pour obtenir des résultats précis. Ainsi, la possibilité de multiplier les données accessibles permet une meilleure évaluation de l'état d'endommagement du matériau.

D'autres techniques de traitement de données supervisées (réseaux neuronaux [107, 108]) ou non supervisées (k-means [109], reconnaissance de formes [101], ...) ont également été utilisées pour classer les événements acoustiques et identifier les mécanismes d'endommagement correspondants.

Lors d'un chargement en fatigue de composites à matrice polymère de fortes distorsions de formes d'ondes avec l'accumulation de l'endommagement peuvent être observées [110]. Ces perturbations conduisent à d'importants changements des paramètres acoustiques comparés à ceux enregistrés lors des essais statiques. Par conséquent, les résultats de la classification des mécanismes d'endommagement peuvent être significativement entachés d'erreurs (de 10% à 30%). Dans ces conditions, un schéma de reconnaissance robuste et adaptatif est alors nécessaire pour effectuer la classification.

La propagation de l'endommagement introduit des perturbations acoustiques limitant la classification des mécanismes. Néanmoins, les paramètres acoustiques ont été utilisés afin d'estimer la limite d'endurance en fatigue d'un matériau composite avec une différence de moins de 5% par rapport à celle déterminée expérimentalement par la courbe de Wöhler [97].

L'analyse temps-fréquence est également une technique de traitement de signaux prometteuse permettant l'obtention de paramètres pertinents supplémentaires. Elle peut également être couplée à une analyse numérique non supervisée (par exemple un réseau de neurones). Dans ce cas, six classes d'ondes acoustiques différentes ont été obtenues pour des stratifiés verre/époxy sous chargement de fatigue [111]. De même, six classes ont été identifiées durant une analyse temps-fréquence par la théorie des ondelettes sur un

composite à fibre de verre [112]. Une difficulté majeure est la corrélation de ces classes avec les mécanismes d'endommagement.

### **I.2.7.2. Localisation des évènements acoustiques**

La possibilité de localiser les sources acoustiques est un point fort de cette technique. L'activité acoustique étant corrélée avec l'endommagement mécanique, la possibilité d'identifier les zones les plus actives, i.e. les plus endommagées, permet une estimation plus précise de l'endommagement des pièces étudiées. Pour être menée à bien, la localisation nécessite un minimum de trois capteurs (triangulation). Elle est d'autant plus précise qu'un nombre important de capteurs est utilisé. Dans le cas où seulement deux capteurs peuvent être placés à la surface du matériau, seule une localisation linéaire peut être réalisée.

Historiquement, cette technique de localisation a été appliquée sur les matériaux métalliques [113, 114] avec des éprouvettes percées afin d'augmenter l'activité acoustique. La précision des résultats est, dans ce cas, de l'ordre du diamètre des capteurs utilisés sur la plaque. A proximité de la zone endommagée ou en cas de variation d'épaisseur du matériau, la précision de la localisation est dégradée. Cette analyse est principalement réalisée sur des panneaux composites en raison de la surface nécessaire pour positionner un réseau de capteurs. Ces pièces planes permettent de mettre en œuvre la méthode à une échelle industrielle et non plus au stade du laboratoire seulement.

Al-Jumaili et al. [115] ont effectué une classification et une localisation des évènements acoustiques lors d'un essai de traction sur une plaque composite à fibre de carbone contenant certaines fibres coupées et deux zones artificiellement délaminées. Dans une étude similaire réalisée lors d'essais de fatigue d'un composite carbone contenant des fibres coupées perpendiculairement à la direction de chargement, les évènements acoustiques ont été localisés au niveau de la coupe. Cependant, leurs amplitudes n'étaient pas aussi élevées que celles classiquement obtenues pour une rupture de fibres [116].

En conclusion, l'émission acoustique est une technique permettant la détection et le suivi continu de l'endommagement en temps réel. La détection multi-échelle obtenue par cette méthode et le développement des outils de classification ont permis l'identification de différents mécanismes d'endommagement se propageant dans les composites. Les capacités

de localisation de cette technique en font un outil efficace pour identifier les zones les plus endommagées du matériau. Les résultats sont d'autant plus précis qu'un grand nombre de capteurs sont placés sur la structure étudiée. Cependant, la restriction aux seuls défauts évolutifs et le caractère global et qualitatif sont les principales limitations de cette méthode. De plus, la sensibilité des ondes acoustiques à l'endommagement limite la classification lors d'un chargement de fatigue.

### **I.2.8. Thermographie infrarouge**

La thermographie infrarouge est une technique sans contact permettant de visualiser le rayonnement électromagnétique émis par chaque point de l'objet observé dans le spectre infrarouge (de  $0.76\mu\text{m}$  à  $1000\mu\text{m}$ ). Ce rayonnement est reçu par un détecteur ou une caméra infrarouge qui le convertit en signal électrique et reconstitue une image thermique de la scène étudiée. Les images de température enregistrées (thermogrammes à l'échelle de l'échantillon) fournissent des informations qualitatives et quantitatives sur les hétérogénéités présentes dans le matériau.

La thermographie infrarouge peut être exploitée sous deux formes différentes : le mode passif [10] consiste en la mesure de l'évolution de la température d'une scène sans aucun apport de chaleur externe ; le mode actif [117] nécessite d'apporter une excitation thermique extérieure afin de provoquer l'apparition d'un gradient de température pour la caractérisation de la pièce étudiée.

#### **I.2.8.1. Thermographie passive**

La thermographie passive permet d'inspecter la surface de l'échantillon sans aucune stimulation thermique externe. Cette méthode est utilisée, par exemple, pour inspecter l'endommagement généré par impact [118] ou sous sollicitation mécanique statique ou dynamique (traction ou fatigue) [119].

Toubal et al. [10] ont corrélé la variation de température avec la propagation de l'endommagement. Les trois zones prédominantes dans le scénario d'endommagement des composites à matrice polymère sont détectées (figure I-9) : l'amorçage, la propagation et la rupture.

Lors de l'utilisation de la thermographie infrarouge, une attention particulière doit être portée à l'échelle de la longueur des endommagements (défauts) survenus dans le matériau et à la résolution spatiale de la caméra infrarouge. En raison de l'emplacement dans l'épaisseur de la zone endommagée au sein du matériau, la projection détectée par la caméra thermique est plus petite que la taille physique des défauts détectés.

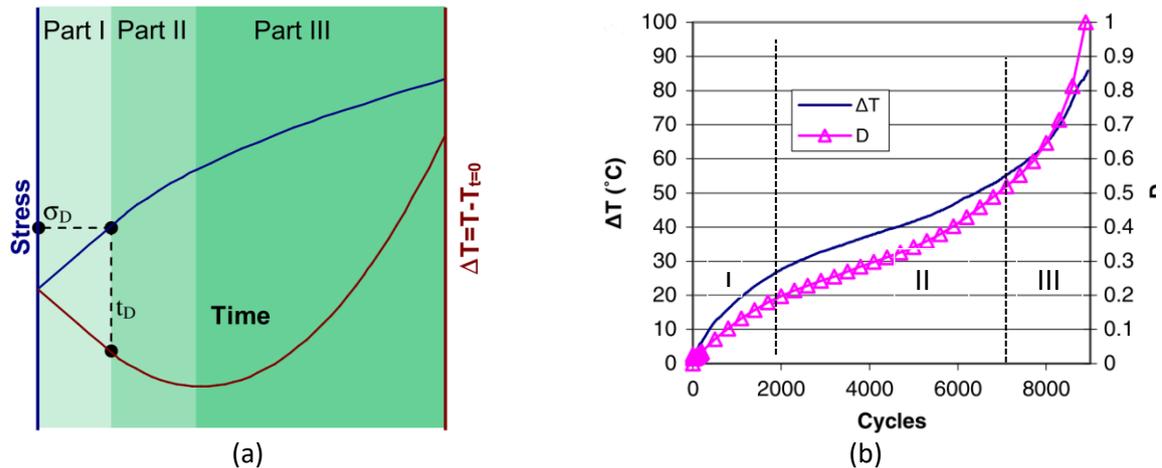


figure I-9 : Evolution (a) de la contrainte et de la température au cours du temps lors d'un essai statique[119] et (b) de l'endommagement et de la température en fatigue au cours du temps [10]

Harizi et al. [120] ont utilisé la thermographie passive pour évaluer l'endommagement généré lors d'essais de traction statique dans un composite à fibre de verre. Les auteurs ont rapporté que la décohésion fibre/matrice provoquait une dissipation de chaleur de courte durée et intense, alors que le délaminage induisait une dissipation thermique plus étendue spatialement et temporellement. Une corrélation est établie entre la quantité de dissipation thermique et le niveau d'endommagement en suivant la variation du coefficient thermoélastique par rapport aux contraintes appliquées jusqu'à la rupture (figure I-10). Cependant, cette évaluation est limitée à ce cas particulier de chargement statique en traction par paliers.

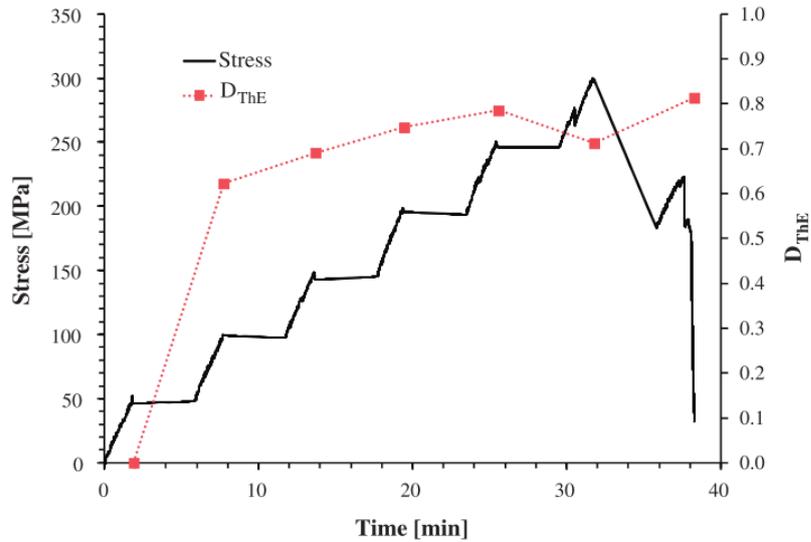


figure I-10 : Evolution de l'indicateur défini sur la base du coefficient thermoélastique du composite sous chargement statique par paliers [120]

Dans le cas d'un chargement mécanique de fatigue, la thermographie passive permet d'évaluer les effets thermoélastiques. L'augmentation du niveau de chargement mécanique génère l'amorçage de phénomènes d'endommagement dissipatifs associés à des sources de chaleur localisées, observables par la caméra [119].

La thermographie passive est également utilisée pour étudier la durée de vie en fatigue dynamique [8, 121, 122] lors d'essais d'auto-échauffement permettant de réduire le temps et le nombre des essais réalisés. Cette technique est principalement utilisée pour étudier les niveaux critiques d'endommagement par fatigue et déterminer la limite d'endurance du matériau. Elle consiste en l'application de blocs (i.e. nombre défini de cycles) de fatigue à contrainte maximale croissante à chaque bloc et en la mesure de l'évolution de la température jusqu'à sa stabilisation pour chaque niveau de contrainte appliqué (figure I-11).

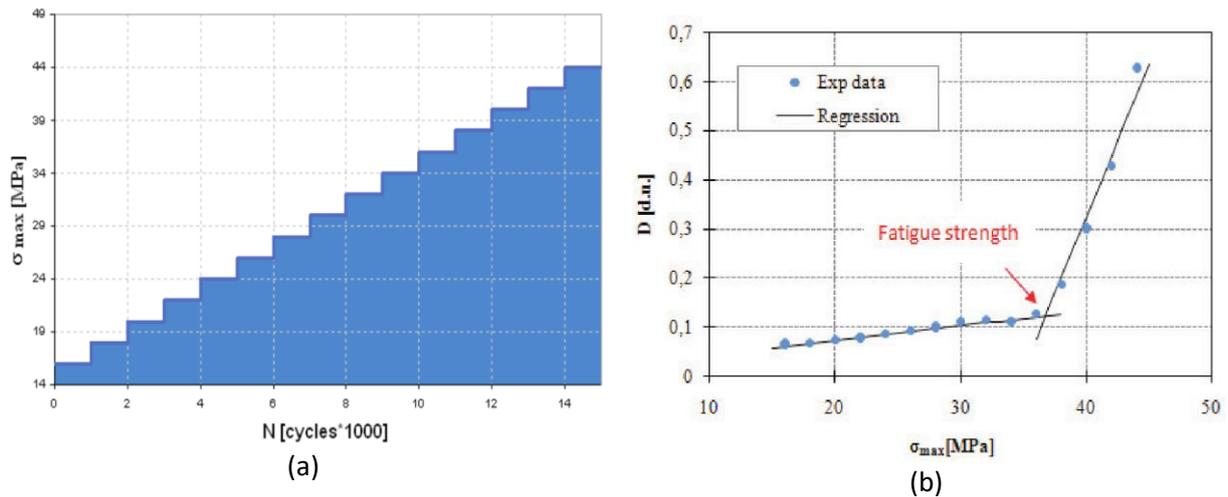


figure I-11 : (a) Paliers de cycles de fatigue appliqués à niveaux de contrainte croissants  
 (b) Détermination de la limite d'endurance sur la base des auto-échauffements induits (adapté de [12])

Dans le cas des composites à matrice polymère, l'évolution des températures de stabilisation (ou des énergies de dissipation correspondantes) par rapport aux contraintes appliquées conduit à une estimation globale de l'endommagement. La limite d'endurance (ou résistance en fatigue) du matériau est identifiée comme étant le point de transition entre le comportement initial du matériau (peu dissipatif) et l'état proche de la rupture (fortement dissipatif). Cette méthode est bien adaptée aux composites minces ( $e < 5\text{mm}$ ). Dans le cas d'échantillons plus épais et de structures composites 3D, les applications de la thermographie passive sont, à notre connaissance, très limitées. L'applicabilité de cette méthode aux composites à matrice polymère a été démontrée avec succès à la fois pour des composites à fibre de carbone [122] et de verre [123]. Une légère différence ( $< 10\%$ ) entre les valeurs des limites d'endurance déterminées par la courbe de Wöhler et par l'essai d'auto-échauffement existe toujours.

Une estimation rapide de la limite d'endurance serait possible lors d'un chargement statique en traction [12]. Ce paramètre est obtenu lorsque la pente à l'origine de la courbe d'évolution de la température ne décrit plus efficacement le comportement thermique du matériau. Le comportement linéaire de l'éprouvette est alors perturbé par une autre source de chaleur assimilée à l'apparition de l'endommagement au sein du composite (figure I-12).

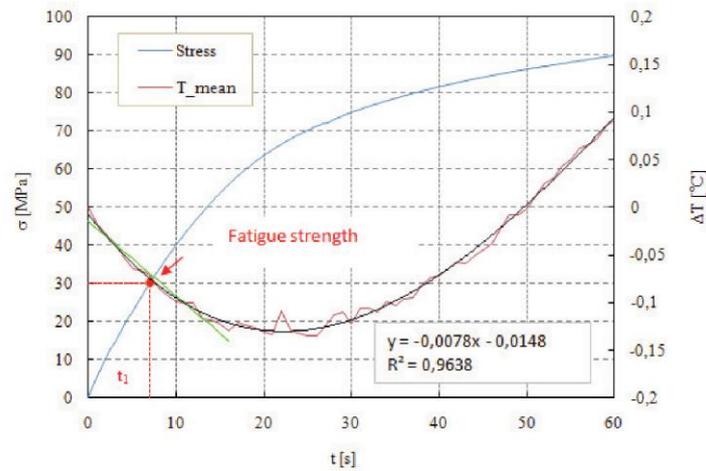


figure I-12 : Détermination de la limite d'endurance par essai statique [12]

En complément du monitoring de la température, il est possible de déterminer la limite d'endurance à l'aide de la variation de l'aire du cycle d'hystérésis de l'échantillon lors d'un essai d'auto-échauffement. Cette approche a été utilisée sur des composites à fibre de carbone [124]. Dans ce cas, des différences significatives (<20%) ont été constatées entre la valeur d'auto-échauffement et la limite d'endurance estimée expérimentalement avec la courbe de Wöhler.

A l'instar de l'émission acoustique, il est possible d'analyser des paramètres complémentaires comme la phase de la transformée de Fourier afin d'évaluer l'endommagement du matériau dans le cas d'un chargement de fatigue. Cette analyse menée sur un renfort tissé permet d'identifier les zones les plus endommagées durant la vie du matériau (figure I-13) [125].

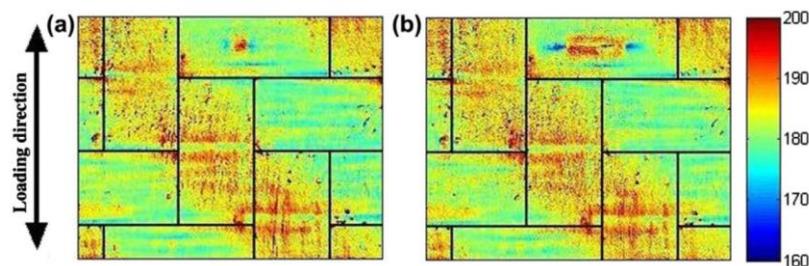


figure I-13 : Analyse de la phase en degrés d'un composite tissé verre/époxy lors d'un chargement de fatigue en traction-traction à 10% de charge à rupture: (a) 40 000 cycles et (b) 46 000 cycles [125]

### I.2.8.2. Thermographie active

La thermographie active consiste à coupler la caméra infrarouge avec une source d'énergie extérieure qui stimule thermiquement le matériau étudié (figure I-14). La sollicitation

thermique peut être réalisée en utilisant des lampes pulsées ou continues, des vibrations acoustiques (vibrothermographie), une source ultrasonore de forte puissance (sonotrode) [126, 127], des lasers, des ultrasons hautes puissance [128] ... La présence d'un déphasage ou d'une variation de la distribution de température du matériau permet l'estimation de son état de santé.

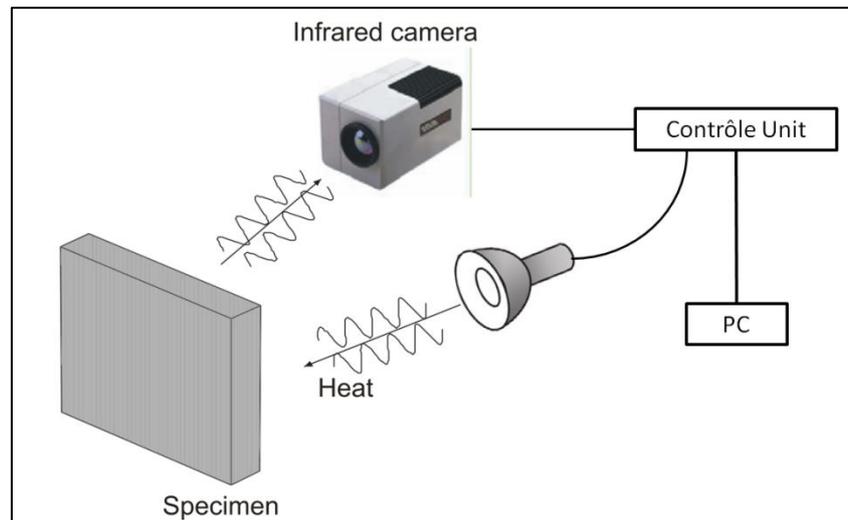


figure I-14 : Principe de de la technique lock-in thermographie en mode réflexion [129]

La thermographie stimulée par flashes a été mise en œuvre avec succès pour détecter des inserts de polytétrafluoréthylène (PTFE) simulant des défauts dans des composites à fibre de carbone [130-132]. Elle a aussi été utilisée pour caractériser le comportement thermomécanique des composites dans le cas d'un chargement de fatigue en traction-traction [10].

La détection de défauts tels que la porosité peut également être effectuée en utilisant la lock-in thermographie. Cette méthode repose sur l'acquisition de cartographies infrarouges de la surface d'un échantillon stimulé par un flux thermique sinusoïdal [133]. En fonction de la fréquence sinusale, des défauts sous-surfaciques (pas plus de 3.5 mm de profondeur) deviennent identifiables [134-137].

La thermographie active a également été utilisée par Harizi et al. [138] pour établir une corrélation entre les niveaux de contrainte appliqués et la vitesse de refroidissement d'un composite à fibre de verre après un chauffage par lampes. Les résultats obtenus à l'aide de cet indicateur d'endommagement ne sont toutefois pas suffisamment sensibles à l'endommagement (à peine 30% détectés à la rupture).

Par ailleurs, la thermographie active a permis d'évaluer la diffusivité thermique en fonction de l'augmentation du taux de porosité dans un composite à fibre de carbone avant et après des chargements mécaniques de fatigue [123, 139]. Une corrélation est mise en évidence entre la diffusivité thermique et le taux de porosité.

Enfin, Fruehmann et al. [125] ont utilisé la thermographie pulsée pour visualiser les fissures matricielles microscopiques dans un composite à fibre de verre en utilisant une analyse de phase basée sur la transformée de Fourier rapide. Les variations du spectre fréquentiel associées aux contraintes résiduelles entourant les fissurations matricielles permettent leur identification. La propagation de fissures peut être quantifiée à l'aide de différents outils de traitement de signal (traitement d'image 1D : Fourier, transformée en ondelettes 1D et traitement d'image 2D : première dérivée, transformée en ondelettes 2D). L'ensemble de ces méthodes appliquées sur un seul cas d'étude met en évidence la propagation de fissures et du délaminage [140]. Chaque mécanisme d'endommagement nécessite un outil de traitement différent afin d'être clairement identifié.

En somme, la thermographie infrarouge passive permet de réaliser un suivi continu de la surface d'un matériau sans sollicitation thermique externe, tandis que la thermographie active est utilisée pour caractériser la présence et l'évolution de défauts au sein du matériau. Une revue bibliographique sur les différentes utilisations et méthodes de la thermographie infrarouge active a été réalisée par Vavilov et al. [117]. Les possibilités de caractérisation sans contact sur toute la surface du matériau sont un aspect intéressant de cette technique. La simplicité de mise en œuvre et la multiplicité des paramètres d'endommagement sont favorables pour mettre en œuvre cette méthode de monitoring en même temps que d'autres. La limitation majeure de cette technique est, en revanche, la caractérisation limitée à la surface et la variabilité des résultats suivant le matériau. En effet, une évaluation des propriétés thermiques génériques est le plus souvent requise avant l'obtention de résultats probants.

### **I.2.9. Corrélation d'images numériques**

La corrélation d'images numériques est une technique optique sans contact utilisée pour mesurer les déformations dans le plan (2D) ou hors plan (3D en stéréo-corrélation) à la

surface d'un échantillon sous chargement mécanique (traction statique ou fatigue dynamique [16, 141, 142]). L'application de cette technique requiert des connaissances dans des domaines divers : optique (stéréovision), traitement d'image (inter-corrélation), mécanique (mécanique des milieux continus, vibrations). Les résultats obtenus sont des cartographies des champs de déformations, à savoir des résultats macroscopiques. Avec le développement de techniques d'analyse d'images, les logiciels de corrélation d'images numériques gagnent de plus en plus en fiabilité par rapport à d'autres techniques de mesure de contraintes telles que la photoélasticité [143] ou l'interférométrie [144, 145].

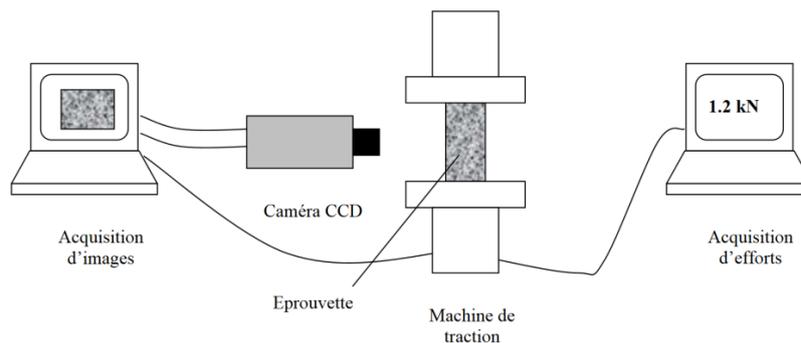


figure I-15 : Principe de la méthode de corrélation d'images numériques

Le protocole utilisé pour évaluer les champs de déformations est constitué des étapes suivantes :

- application du mouchetis sur la surface d'étude de l'échantillon,
- enregistrement des déformations du mouchetis pendant le chargement mécanique avec les caméras,
- analyse numérique des données avec la définition des paramètres logiciels (subset et pitch [146]),
- calcul des champs de déformations.

Une revue plus détaillée du contexte théorique et des applications de cette technique est fournie par Aparna et al. [147].

La corrélation d'images numériques ne permet pas une évaluation des mécanismes d'endommagement à l'échelle microscopique et dans l'épaisseur du matériau. Cependant, cette technique peut indiquer efficacement les zones de contraintes élevées pouvant conduire à des foyers d'endommagement mésoscopiques ou macroscopiques.

Afin d'identifier la propagation des fissures, la corrélation d'images a été utilisée pour étudier la qualité des joints adhésifs entre panneaux multicouches [148]. Les auteurs ont corrélé les niveaux de déformation les plus élevés et l'amorçage de la fissure dans le joint sous contrainte de cisaillement. La propagation de la fissure dans le joint de liaison a également été visualisée avec cette technique.

Par ailleurs, la corrélation d'images a été utilisée lors d'essais de fatigue sur des stratifiés croisés verre/époxy  $[0^\circ, 90^\circ]_s$  pour mesurer l'évolution de l'énergie de déformation cinématique. Les résultats expérimentaux obtenus peuvent être corrélés avec l'énergie de déformation et la dégradation du module d'Young du matériau (figure I-16) [149].

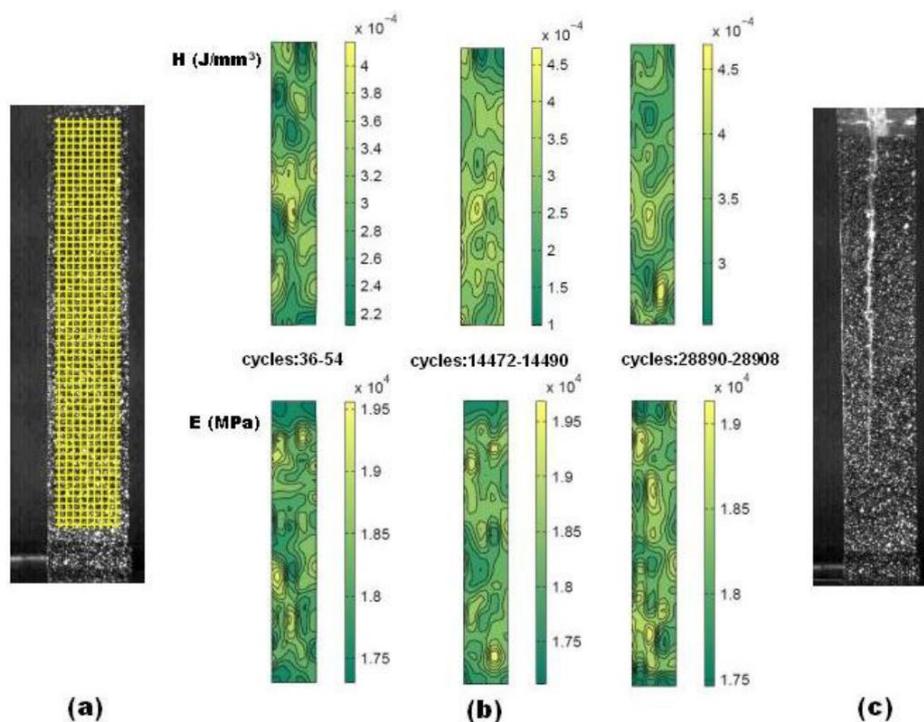


figure I-16 : Corrélation d'images numériques appliquée à un composite stratifié : (a) Epreuve avec maillage superposé, (b) Cartographies de l'énergie volumique et du module, (c) épreuve à la ruine [149]

Montesano et al. [150] ont étudié le cas d'une structure composite carbone/époxy orthotrope sous chargement de fatigue et cherché à prédire l'évolution de l'endommagement. Ils ont utilisé les champs de déformation et l'énergie dissipée par le matériau afin de valider un modèle numérique (éléments finis) de l'éprouvette. La possibilité d'utiliser des champs de déformation basés sur les résultats de corrélation d'images numériques pour calculer les variables scalaires d'endommagement a été confirmée. Une étude en fatigue de l'énergie dissipée par corrélation d'image a aussi été réalisée par

Benaarbia et al. [16]. Dans ce cas, la diminution du module d'Young est liée à l'énergie dissipée par le matériau, ici un composite verre/époxy avec un empilement à [0, 90]. Les cartographies de ces deux quantités permettent la localisation des zones les plus endommagées. Cette méthode peut aussi être généralisée avec les champs de déformation [125].

L'étude des champs de déformation mesurés par corrélation d'images numériques peut, en outre, permettre de mieux comprendre l'influence de l'architecture du renfort (sergé, toile, ...) et l'évolution du délaminage à l'échelle macroscopique lors d'un essai statique [151, 152].

Ces quelques exemples illustrent l'intérêt de la corrélation d'images pour le suivi et l'identification des zones endommagées au sein d'un composite [2, 152, 153]. Les données surfaciques obtenues peuvent être comparées avec les autres résultats d'imagerie des techniques précédemment évoquées.

Cette méthode présente toutefois des limitations proches de celles évoquées pour la thermographie infrarouge. Les inspections surfaciques ne permettent pas la visualisation de l'endommagement dans l'épaisseur du matériau. De plus, cette méthode présente une grande sensibilité aux conditions expérimentales (éclairage, géométrie des lentilles et encombrement), y compris avec le mouchetis à appliquer sur la surface de l'échantillon dont dépend grandement la qualité des résultats obtenus.

### **I.2.10. Ultrasons**

Les essais ultrasonores exploitent la réflexion, la transmission ou la rétrodiffusion des ondes élastiques dans les matériaux. Les ondes ultrasonores couvrent un large spectre de fréquences : de 20kHz à plus de 1GHz. La plupart des applications non destructives industrielles utilisent les fréquences comprises entre 0.5 et 10MHz. Plusieurs types d'ondes élastiques peuvent se propager dans les milieux : les ondes volumiques, séparées en ondes de compression (longitudinales) et de cisaillement (transversales) ; les ondes de surface ou de Rayleigh; et les ondes guidées telles que les ondes de Lamb dans les plaques (modes symétriques et antisymétriques).

Un fluide de couplage acoustique (tel que de l'eau, du gel ou de l'huile) est nécessaire pour effectuer des mesures ultrasonores. Ceci introduit des problématiques supplémentaires lors

de l'inspection des pièces composites en cas de mauvais couplage. De plus, le couplant doit être choisi afin de ne pas contaminer le matériau étudié.

### I.2.10.1. Ondes de volume

La propagation des ondes ultrasonores est régie par l'équation suivante :

$$\rho \frac{\partial^2 U_i}{\partial t^2} = C_{ijkl} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_k} \quad (1.1)$$

où U est le champ de déplacement et  $C_{ijkl}$  le tenseur des rigidités d'ordre 4 spécifique au matériau.

Le modèle de l'onde plane est une solution de cette équation différentielle. Dans un matériau quasi-isotrope transverse, le tenseur des rigidités peut être simplifié en une matrice regroupant les différentes constantes caractéristiques du matériau, soit dans ce cas 5 constantes indépendantes :

$$C = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & & & \\ C_{12} & C_{11} & C_{13} & & & \\ C_{13} & C_{13} & C_{33} & & & \\ & (sym) & & C_{44} & 0 & 0 \\ & & & 0 & C_{44} & 0 \\ & & & 0 & 0 & \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

L'anisotropie des matériaux composites peut être caractérisée à l'aide d'ondes ultrasonores. En effet, leur propagation dépend des différentes propriétés élastiques correspondant aux différentes directions d'anisotropie [154]. A l'aide des coefficients de Christoffel, il est possible d'estimer chaque constante en fonction d'une vitesse d'onde selon ses directions de propagation et de polarisation.

$$\begin{cases} \rho V_{11}^2 = C_{11} \\ \rho V_{33}^2 = C_{33} \\ \rho V_{13}^2 = C_{44} \\ \rho V_{12}^2 = \frac{C_{11} - C_{12}}{2} \end{cases} \quad (1.3)$$

Ces rigidités et leur évolution avec l'endommagement peuvent être utilisées comme paramètre d'endommagement. Cette caractérisation permet, à terme, d'identifier les directions du matériau les plus dégradées par la sollicitation mécanique.

Cette analyse peut être menée durant toute la vie du composite pour identifier les effets de l'endommagement sous fatigue mécanique. Pour ce faire, la caractérisation ultrasonore est réalisée suivant différents angles qui sollicitent des constantes par rapport à un tir ultrasonore normal à l'éprouvette. La connaissance des vitesses de propagation dans le matériau permet de remonter aux constantes d'élasticité par méthode inverse (valeurs des constantes issues d'une optimisation via un algorithme de résolution des problèmes inverses).

Le C-scan ultrasonore en mode pulse écho permet de caractériser le matériau à l'aide de cartographies bidimensionnelles (figure I-17). Cette technique permet, par balayage de l'échantillon, d'identifier et de localiser les différentes zones les plus endommagées notamment par délaminage [116].

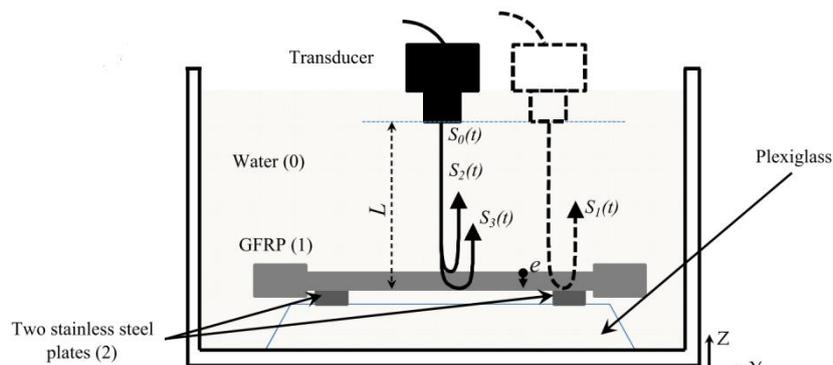


figure I-17 : Principe du C-scan immersion en mode pulse-écho [155]

Les matériaux composites étant hétérogènes, leur pénétration par les ondes ultrasonores à haute fréquence est limitée s'agissant de la détection des mécanismes d'endommagement ayant lieu à l'échelle microscopique. Cependant, dans le cas particulier de la microscopie acoustique (plus de 100 MHz), des fréquences élevées permettent la détection de fissures matricielles [156] ou de la décohésion de l'interface.

Le C-scan a été appliqué par Harizi et al. dans le sens de l'épaisseur d'un composite verre/époxy  $[0^\circ/90^\circ]_s$  après plusieurs paliers de traction pour évaluer l'endommagement induit perpendiculairement à la direction de chargement. Le suivi de l'endommagement a été réalisé avec des cartographies de variation de densité et d'un algorithme de segmentation d'image (figure I-18) [155]. Les différences entre les cartographies mettent en évidence l'hétérogénéité de la distribution au sein du matériau et même l'apparition de

porosités (résultat macroscopique). Ces endommagements ont été caractérisés en analysant, au niveau du pixel, le changement de densité entre les éprouvettes chargées et non chargées.

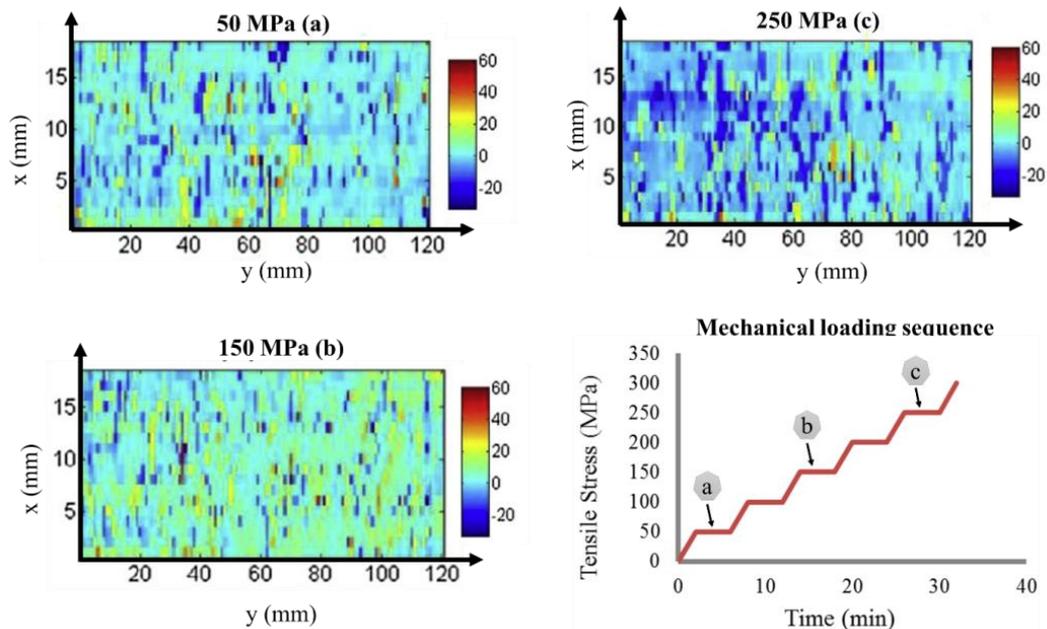


figure I-18 : Evolution de la densité relative ( $\rho_{\text{avant chargement}} - \rho_{\text{après chargement}} / \rho_{\text{avant chargement}}$ ) de composites stratifiés [0°/90°]S à différents stades de chargement (adapté de [155])

Dans le cas de l'inspection de matériaux épais (jusqu'à 50mm), les essais sont réalisés à des fréquences plus basses, par exemple 0.5MHz, dans le cas des structures verre/époxy [157-159].

Afin de s'affranchir des problématiques de couplage, les ultrasons à couplage d'air offrent une perspective intéressante. Cette technologie est limitée à des applications basses fréquences (habituellement de 50kHz à 0.8MHz) [158, 160, 161]. Hsu et Barnard ont analysé la transmission spectrale d'ondes ultrasonores (D-scan) dans des plaques composites carbone/époxy de différentes épaisseurs allant de 1mm à 51mm [160]. Une réduction de l'amplitude de transmission d'environ 80% a été constatée entre ces deux épaisseurs extrêmes. Borum et al. ont, quant à eux, inspecté avec succès un composite verre/polyester de 48mm d'épaisseur avec des ultrasons couplés à l'air à 120kHz et 400kHz [158]. Enfin, Revel et al. ont utilisé la même technologie de capteurs à couplage d'air pour inspecter les structures sandwiches avec une âme en mousse de faible densité de plus de 50mm d'épaisseur [161].

### I.2.10.2. Ondes de Lamb

Les ondes de Lamb sont des ondes de plaques ayant la particularité d'être guidées par la structure étudiée. La propagation à travers l'ensemble de l'éprouvette induit également une faible atténuation sur plusieurs mètres.

Les propriétés de propagation des ondes de Lamb dépendent du ratio entre l'épaisseur de la plaque étudiée et la fréquence de l'onde excitatrice, ( $f \times e$ ). Deux modes de propagation existent quelle que soit la valeur du critère : les ondes antisymétriques et symétriques (figure I-19).

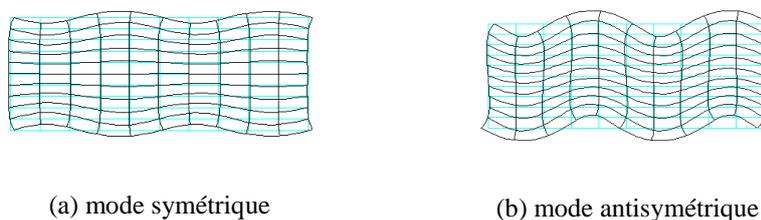


figure I-19 : Ondes symétriques (a) et antisymétriques (b) (adapté de [162])

Les différences entre les deux modes ne sont pas que de forme. La vitesse de ces ondes dans le matériau diffère aussi en fonction du rapport ( $f \times e$ ). La mesure de la vitesse permet, entre autres, l'évaluation de la rigidité considérée.

Les modes symétriques et antisymétriques ont été utilisés afin d'évaluer l'état d'endommagement global d'un matériau composite carbone/époxy (figure I-20) [162]. Les différentes phases de dégradation du matériau sont identifiables. Deux tissus sont insérés au sein du composite à différentes épaisseur. Les modes symétriques et antisymétriques sont alors enregistrés tout au long de la propagation de l'endommagement généré par fatigue.

Le mode fondamental symétrique est le plus sensible aux propriétés mécaniques, telles que le module d'élasticité, donc plus efficace pour détecter un changement de la rigidité du matériau [163]. En revanche, le mode fondamental antisymétrique est bien adapté pour détecter le délaminage et les fissures transversales dans les composites à fibre de verre ou carbone [164]. Ainsi, un délaminage de taille millimétrique a été caractérisé à l'aide d'ondes de Lamb lors d'une analyse B-scan (résultat d'un scan dans une direction) dans une poutre composite carbone/époxy [165, 166].

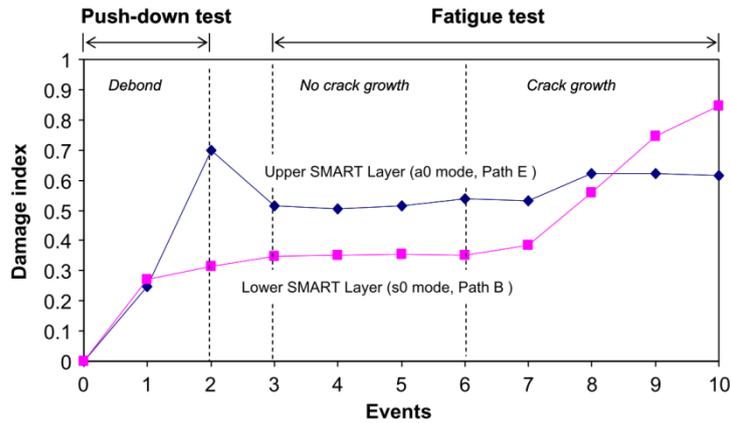


figure I-20 : Evolution de l'endommagement d'un composite suivant le nombre de milliers de cycles en fatigue [162]

Les ondes de Lamb ont également été utilisées in-situ et ex-situ pour évaluer l'état de dégradation induit par fatigue bi-axiale dans un tube composite verre/époxy (figure I-21) [167]. L'essai C-scan en transmission hors contrainte, en utilisant l'amplitude comme indicateur d'endommagement, permet la localisation de l'endommagement du tube. Les ondes de Lamb permettent de suivre les différentes étapes de fatigue ainsi que l'évolution des propriétés élastiques du matériau.

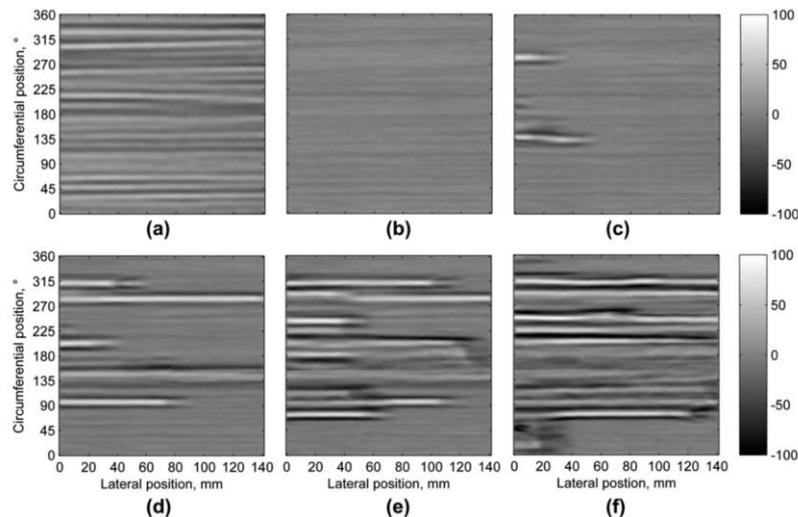


figure I-21 : Etude de l'état de santé d'un tube de verre/époxy en fatigue: à (a) 34%, (b) 40%, (c) 60%, (d) 80%, (e) 90%, (f) 99% de durée de vie [167]

Pour conclure, la méthode ultrasonore permet la détection et la caractérisation de l'endommagement, soit dans l'épaisseur avec les ondes de volume, soit à l'échelle macroscopique avec les ondes de Lamb. Cependant, le suivi continu en temps réel de l'endommagement n'est pas réalisable dans la majorité des cas. Ces méthodes sont donc utilisées dans le cas du contrôle hors contraintes. De plus, l'inspection requiert l'usage d'un couplant (partiel ou immersion) pour réaliser le contrôle.

### I.2.11. Approche multi-technique non destructives

Chacune des techniques présentées précédemment offre des avantages et présente des limitations (Tableau I-1). Certaines autorisent un suivi en temps réel et sous-contrainte, d'autres nécessitent des mesures hors contrainte. Les données enregistrées sont multi-variables et peuvent être redondantes ou complémentaires.

L'utilisation d'une seule technique de contrôle non destructif ne permet pas d'obtenir une caractérisation complète de l'endommagement (figure I-22). Chacune d'entre elles présente une sensibilité différente à l'endommagement et requiert des conditions spécifiques afin de pouvoir réaliser la mesure.

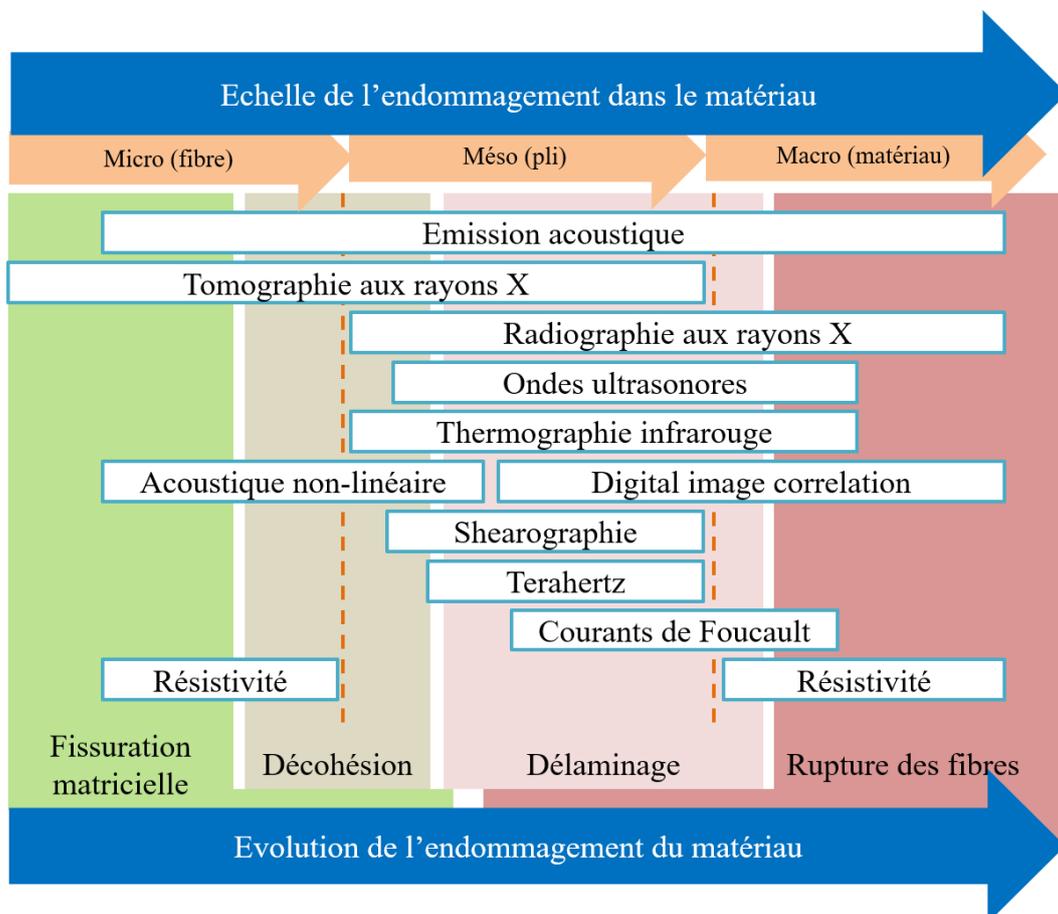


figure I-22 : Utilisation possible des techniques de contrôle non destructif pour la détection des endommagements (étendue des domaines suggérés pour chaque technique ajustée selon la bibliographie) [6]

Tableau I-1 : Applicabilité des techniques de contrôle non destructif pour la détection et la caractérisation de l'endommagement avec avantages et limites associées [6]

NDT	Détection de l'endommagement				Caractérisation de l'endommagement (taille et localisation, ...)	Avantages	Limites	Références
	Fissuration matricielle	Décohésion fibre/matrice	Délaminage	Rupture des fibres				
Emission acoustique	+++	++	+++	+++	Localisation	Temps réel Structural health monitoring	Besoin de chargement mécanique Méthode globale	[2, 9, 96-116]
Ondes ultrasonores	+ (Fréquence au-delà de 100MHz)		+++		Caractérisation complète (taille, localisation, ...)	Méthodes quantitatives Tous matériaux	Besoin d'agent couplant Difficulté d'interprétation	[116, 154-167]
Acoustique non linéaire	++	+			Localisation avec la technique LDR	Forte sensibilité à l'endommagement microscopique	Méthode de laboratoire Difficultés d'implémentation	[48-65]
Corrélation d'images numériques	+	++			Localisation sur la surface	Méthode sans contact Mesure de champs de déformations	Besoin d'un mouchetis Résultats surfaciques seulement	[2, 16, 125, 141-153]
Radiographie et tomographie par rayons X	++	+++	+++	+++	Caractérisation complète (taille, localisation, ...)	Analyse 3D Méthode d'imagerie	Problématiques de santé (rayons ionisants) Méthode de laboratoire	[66-78]
Thermographie infrarouge		++	++		Localisation en surface ou sub-surfacique	Méthode sans contact en actif et passif Méthode d'imagerie	Résultats surfaciques ou sous-surfaciques uniquement	[8, 10, 12, 117-140]
Shearographie		+	+		Localisation en surface	Méthode sans contact et d'imagerie	Besoin de chargement mécanique Résultats surfaciques	[17-27]
Térahertz			+		Localisation en surface sub-surfacique	Analyse en haute résolution Méthode d'imagerie	Forte atténuation notamment sur les matériaux conducteurs	[40-47]
Résistivité	+		+++	+	Localisation dans le cas multiples électrodes	Mesure autonome Structural health monitoring Temps réel	Besoin d'un équipement de mesure Limité aux matériaux conducteurs	[79-95]
Courants de Foucault			++	+	Localisation en surface sub-surfacique	Inspection rapide Pas de nécessité de contact	Limité aux matériaux conducteurs Résultats surfaciques seulement	[28-39]

Afin de pallier les difficultés et limitations propre à chaque technique, une nouvelle approche a commencé à être développée dans les années 1990 reposant sur une stratégie de contrôle multi-technique. Ainsi, les limitations associées à une technique non destructive peuvent être compensées par les autres. Il est possible d'estimer la sensibilité de chaque technique à l'endommagement en vérifiant les potentielles redondances et complémentarités. Cependant, des conflits entre les techniques peuvent alors être mis en évidence et même générer des résultats contradictoires. Pour résoudre cette problématique, il est nécessaire de trouver une méthode afin de produire un diagnostic de l'endommagement le plus précis possible à partir de paramètres d'endommagement hétérogènes spatialement et temporellement.

Les techniques infrarouges et ultrasonores ont été utilisées initialement de façon compétitive pour évaluer le taux de porosité dans les composite carbone/époxy [168]. Grâce à une analyse d'incertitude, les auteurs ont suggéré l'utilisation de la technique ultrasonore si la porosité est inférieure à 4.5% et la technique de thermographie au-delà. Ce cas présente l'intérêt d'utiliser plusieurs techniques afin d'obtenir des données complémentaires pour l'évaluation de l'endommagement.

La thermographie et la corrélation d'images numériques ont souvent été combinées pour réaliser le suivi de l'endommagement des composites pendant des essais mécaniques [16, 152, 169]. Lors d'un essai de traction statique sur un polymère renforcé de fibres de verre, la corrélation d'images numériques a fourni des informations plus précises (évolution de la rigidité) que la thermographie infrarouge. Les données thermiques étaient perturbées par le bruit environnant lors de l'expérimentation [152].

La corrélation d'images numériques, l'émission acoustique et la thermographie infrarouge ont été utilisées simultanément pour détecter l'endommagement dans un échantillon composite carbone/époxy sous traction statique [2]. Les auteurs ont conclu que l'émission acoustique est bien adaptée à la surveillance des fissures matricielles, alors que la rupture de fibre et le délaminage sont mieux détectés par la thermographie. Le même scénario d'endommagement du matériau est alors obtenu avec les trois techniques non destructives utilisées.

Ces trois techniques (émission acoustique, thermographie, corrélation d'images) ont aussi été utilisées pour quantifier le processus de dégradation en statique et en fatigue dans les composites verre/époxy [170]. Le besoin d'un système de contrôle non destructif hybride pour identifier l'amorçage et le développement progressif de l'endommagement sous chargement mécanique a été démontré.

Une autre étude multi-technique a combiné la tomographie aux rayons X, la thermographie infrarouge passive et la corrélation d'images numériques pour caractériser l'endommagement sous chargement statique de composites à fibre de carbone, conduisant à un diagnostic plus précis de l'endommagement [171].

Enfin, Chaki et al. [172-174] ont utilisé plusieurs techniques non destructives (émission acoustique, thermographie infrarouge passive et active, ondes ultrasonores de volume et de Lamb) pour caractériser in situ l'endommagement dans un stratifié verre/époxy au cours d'un essai de traction statique par paliers jusqu'à la rupture. Des indicateurs d'endommagement originaux liés aux différentes techniques utilisées ont été définis (figure I-23). Le potentiel d'évaluation de l'endommagement de chaque technique a été mis en évidence et la nécessité d'une telle approche multi-technique pour un diagnostic plus efficace a été confirmée.

### **I.2.12. Bilan**

Chaque technique présentée dans ce chapitre ne permet pas, utilisée seule, une analyse complète de l'endommagement. Les limitations peuvent être la zone d'observation, la non-prise en compte d'une dimension du matériau (notamment l'épaisseur), les conditions d'application (mouchetis et éclairage en corrélation d'images), les conditions d'essai (sous contraintes ou hors contrainte). Les informations collectées sur l'endommagement diffèrent, en outre, selon la technique de contrôle mise en œuvre : cartographies de la zone d'étude (corrélation d'images, thermographie), localisation linéaire au sein de l'éprouvette (émission acoustique) ou encore scalaires caractérisant l'état d'endommagement global du matériau (ondes de Lamb, résistivité).

Technique CND	Indicateur d'endommagement associé	Evolution des indicateurs d'endommagement en fonction du chargement mécanique appliqué
Emission acoustique	DEA Nombre d'évènements acoustiques cumulés	
Thermographie passive (IRT-p)	DIRT-p Evolution du coefficient thermo-élastique	
Thermographie active (IRT-a)	DIRT-A Evolution de la vitesse de refroidissement	
Ondes volumiques (LW)	DLW-A Evolution de l'amplitude des ondes dans le sens longitudinal	
	DLW-E33 Evolution du module dans l'épaisseur	
Ondes guidées (GW)	DGW-SE Evolution de l'énergie spectrale	
	DGW-E11 Evolution du module longitudinal	

figure I-23 : Indicateurs d'endommagement pour différentes méthodes d'essais non destructifs (adapté de [172, 174])

L'approche multi-technique permet alors de dépasser les limites de chaque technique afin d'aboutir à une estimation plus précise de l'endommagement. En effet, si les techniques utilisées apportent des informations complémentaires, toutes les facettes de l'endommagement sont prises en compte. Dans le cas d'informations redondantes, le

diagnostic de dégradation de l'éprouvette est alors confirmé et réduit les possibilités d'erreur du diagnostic final. Enfin, la possibilité de conflit entre les techniques est également une source d'information, même si l'indétermination doit être levée usuellement en mettant en œuvre une stratégie de fusion de données.

### **I.3. Traitement et fusion des données**

L'instrumentation d'un même essai mécanique avec plusieurs techniques de contrôle non destructif permet d'envisager une caractérisation la plus complète possible de l'endommagement. Les données brutes obtenues nécessitent alors différents traitements afin de déterminer des paramètres pertinents pour l'évaluation de la dégradation du matériau.

La définition de multiples paramètres d'endommagement ne permet cependant pas une évaluation simple de la dégradation mécanique (analyse de plusieurs paramètres). Afin de faciliter cette analyse, il est souhaitable de mettre en œuvre une stratégie de fusion de données afin d'optimiser et de fiabiliser le diagnostic de l'état de santé de la pièce considérée.

Différentes stratégies de fusion de données sont envisageables. La majorité des applications au cas des composites fait appel à des méthodes de fusion basées sur des théories mathématiques déterministes (moyenne, maximum, théorie de Dempster-Shafer, théorie bayésienne), plus rarement sur des méthodes indéterministes telles que les réseaux de neurones artificiels ou les machines à support de vecteur.

Cette dernière partie se focalisera par conséquent sur les outils de classification (analyse des composantes principales) et de traitement de données disponibles, puis sur les différentes méthodes de fusion de données.

#### **I.3.1. Analyse des composantes principales**

L'analyse des composantes principales est une méthode qui permet d'étudier les corrélations entre les différentes variables d'entrées d'un problème. Avoir le bon descripteur permet de réduire les redondances d'informations parmi les paramètres étudiés. Cette méthode a été utilisée particulièrement dans le domaine de l'émission acoustique [111, 173,

175]. Dans toutes ces études, seuls les paramètres pertinents sont utilisés comme source d'entrée aux algorithmes de classification. Le but de la méthode est de trouver une base principale (i.e. orthogonale) représentative de l'ensemble des paramètres.

Pour mettre en évidence les similitudes des données, les différents descripteurs empiriques sont positionnés sur un espace à deux dimensions. Ainsi, chaque entrée  $V$  se décompose en deux vecteurs :

$$\begin{aligned} V_1 &= A_1 e_1 + A_2 e_2 \\ V_2 &= B_1 e_1 + B_2 e_2 \\ V_3 &= C_1 e_1 + C_2 e_2 \end{aligned} \quad (1.4)$$

Il suffit ensuite de reporter les coordonnées  $A_i, B_i, C_i$  dans le plan  $(e_1, e_2)$ . Lorsque deux vecteurs sont proches en termes de directions, on considère que ces variables sont fortement corrélées entre elles. A l'inverse, si elles apparaissent comme orthogonales, elles sont considérées comme complémentaires et non-corrélées.

L'application de l'analyse des composantes principales aux données de l'émission acoustique obtenues lors d'un essai de fatigue sur un composite verre/époxy a permis l'identification des classes acoustiques associées aux mécanismes d'endommagement [100, 108]. Cette analyse a été suivie d'une classification par k-means afin de déterminer les signatures acoustiques et les mécanismes d'endommagement associés.

Une approche similaire a été utilisée dans le but de d'identifier les paramètres relatifs au bruit hydraulique de la machine d'essai [101]. Quatre grandes phases ont été mises en évidence :

- 0-20% : émissions acoustiques de fortes énergie et amplitude (rupture des fibres les plus faibles),
- 20-50% : réduction de l'activité acoustique,
- 50-85% : reprise de l'activité (probablement induit par le développement du délaminage et la rupture des fibres),
- 85-100% : ruine du matériau.

La méthode d'analyse des composantes principales a également été mise en œuvre dans le cas de la thermographie infrarouge [176]. Cette approche permet l'obtention de

thermographes plus contrastés et une identification des zones endommagées avant l'apparition de fortes variations thermiques. L'utilisation d'un nombre de classes connu à l'avance (analyse supervisée) est la configuration permettant l'obtention des meilleurs résultats.

En somme, l'utilisation de l'analyse des composantes principales permet l'identification des paramètres non-corrélés. Ainsi, à l'aide de cette méthode statistique, il est possible de ne conserver que l'information pertinente pour chaque technique non destructive utilisée. Cependant, cette approche ne permet pas d'obtenir une évaluation de l'état d'endommagement. Afin de résoudre cette problématique, il est nécessaire de développer en parallèle une approche de fusion de données pour caractériser l'endommagement à partir des paramètres identifiés.

### **I.3.2. Méthodes déterministes pour la fusion de données**

La fusion de données a vu le jour dans les années 1990 puis son développement a été interrompu pour privilégier celui de chacune des techniques de contrôle du fait des capacités de calcul limitées de l'époque. Plusieurs théories ont été envisagées : la logique floue, la théorie de l'incertain, la modélisation bayésienne ou celle de Dempster-Shafer. Ces théories accordent toutes davantage de souplesse à l'évènement « inconnu » et la possibilité d'attribuer des évènements dans cette classe [177]. La théorie la plus appliquée pour le contrôle non destructif est celle de Dempster-Shafer.

Trois niveaux de fusion sont possibles. Le premier est appelé fusion basse (ou de bas niveau) s'appliquant dès l'enregistrement des données par les capteurs. La fusion intermédiaire a lieu sur des données post-traitées (filtrage et autres). Le dernier niveau de fusion dit de haut niveau a lieu avec des informations qualitatives, i.e. des décisions et non plus des données.

Dans les différents cas décrits ultérieurement, les données à fusionner doivent nécessairement être homogénéisées (dans le temps et l'espace en utilisant une unité commune). L'absence de ces calages ne permet pas de comparaison entre les différents paramètres utilisés.

### I.3.2.1. Fusions de données conventionnelles

Sans utiliser de formalisme mathématique complexe, il est déjà de possible définir plusieurs méthodes de fusion de données. Elles sont décrites par Gros et al [178] et sont relativement simples à mettre en œuvre :

- Fusion suivant le paramètre maximum : elle consiste à ne conserver que le paramètre maximum de la série de données à fusionner. Il est nécessaire que les paramètres soient équilibrés entre eux sous peine qu'un seul indicateur impose son comportement, allant à l'encontre de l'idée même de la fusion.
- Fusion à l'aide d'un paramètre moyen : il est envisageable d'utiliser la moyenne des paramètres plutôt que la valeur maximale. Dans ce cas, le résultat obtenu prend bien en compte l'ensemble des paramètres pour procéder à la fusion plutôt que de ne conserver que le plus élevé.
- Fusion à l'aide d'un opérateur logique ET : cet opérateur de fusion est le plus sévère parmi ceux présentés. Ainsi défini, un résultat est validé seulement si au moins plusieurs paramètres concordent en ce sens. Cependant, cette fusion présente également le risque de ne pas prendre en compte des événements réellement survenus dû à une sévérité trop importante.

La stratégie de fusion de données est déjà largement utilisée dans le domaine médical ou dans l'analyse d'images. Dans le domaine des contrôles non destructifs, les applications ont commencé par la fusion de données au niveau du pixel avec Gros et al. [178]. Seules deux techniques ont été utilisées dans cette première approche : les courants de Foucault et la thermographie infrarouge sur des composites carbone/époxy. Afin d'identifier des zones délaminées, différentes approches de fusion de données ont été mises en œuvre (identification de la surface endommagée) et comparées avec une mesure de C-scan de la même pièce, considérée comme méthode de référence. Les résultats les plus concluants sont ceux obtenus avec la théorie de Dempster-Shafer.

Ces méthodes classiques de fusion de données apparaissent toutefois rapidement limitées. Une approche plus élaborée peut être préférée.

### I.3.2.2. Modélisation de Dempster-Shafer

Cette méthode de fusion de données est basée sur le formalisme mathématique de la théorie de l'évidence introduit par Dempster [179]. Ce modèle mathématique a ensuite permis à Shafer [177] d'ajouter un paramètre d'incertitude aux données obtenues à l'aide de fonctions de croyance. Pour cela, on suppose l'existence d'un ensemble connu  $\Omega$  appelé cadre de discernement :

$$\Omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N\} \quad (1.5)$$

Ce cadre est composé de N hypothèses exhaustives et exclusives. Ainsi, pour un sous-ensemble A, on peut construire l'ensemble  $2^\Omega$  contenant les  $2^N$  propositions A de  $\Omega$ .

$$2^\Omega = \{A/A \subseteq \Omega\} \quad (1.6)$$

La croyance est alors une fonction notée m de  $2^\Omega$  dans [0, 1] qui vérifie la relation :

$$\sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1 \quad (1.7)$$

On introduit alors la définition d'un élément focal de  $\Omega$  tel que pour chaque sous-ensemble A de  $\Omega$  on a  $m(A) \neq 0$ . La quantité  $m(A)$  correspond alors au degré de croyance alloué à la proposition A et qui n'est pas encore attribué à un sous-ensemble plus spécifique que A. Par ailleurs, la fonction associée à  $m(\emptyset) = 0$  est dite normale.

A l'aide de ces définitions, il est possible de définir de nouvelles fonctions de croyance comme la plausibilité et la crédibilité :

$$pl(B) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(A) \quad \forall B \subseteq \Omega \quad \text{et} \quad bel(B) = \sum_{A \subseteq B} m(A) \quad \forall B \subseteq \Omega \quad (1.8)$$

La plausibilité est la part de croyance qui pourrait être allouée à B en prenant en compte l'ensemble des éléments qui ne discréditent pas B. La crédibilité représente l'ensemble de la croyance apportée aux éléments de cette proposition. Ces deux quantités sont duales et assimilables à des bornes inférieures et supérieures de la fonction m.

Dans le cas de sources distinctes, comme pour le contrôle non destructif (émission acoustique, thermographie infrarouge, ...) ou pour des paramètres distincts, la fusion de Dempster-Shafer est réalisée avec la loi de combinaison de Dempster (i.e. somme orthogonale). Elle est définie par :

$$\forall A \in 2^\Omega \quad m(A) = m_1(A) \oplus \dots \oplus m_q(A) \quad (1.9)$$

où  $\oplus$  est l'opérateur de la combinaison de la somme orthogonale.

La fusion est ainsi réalisée selon la formulation suivante dans le cas de deux sources  $S_i$  et  $S_j$ .

$$m(C) = \frac{1}{1-K} \sum_{A \cap B = C} m_i(A) \cdot m_j(B) \quad \text{avec} \quad K = \sum_{A \cap B = \emptyset} m_i(A) \cdot m_j(B) \quad (1.10)$$

Dans cette définition,  $K$  est le coefficient permettant de refléter le conflit entre les deux sources. S'il est égal à 1 le conflit est trop important pour permettre la fusion, à l'inverse, pour  $K=0$ , les sources sont en accord ou redondantes.

L'intérêt principal de cette méthode réside dans la gestion des masses de croyances qui peuvent être transférées à un coefficient d'ignorance qui n'est pas forcément le complément de la croyance connue.

Une question toujours à l'étude est l'utilisation de la somme orthogonale afin de réaliser la fusion. En effet, la littérature présente de nombreux exemples d'autres règles de combinaison [180]. Une problématique majeure de cette méthodologie de fusion consiste en l'attribution des masses de croyance dans les applications réelles. Dans le cas où ces masses sont correctement définies, les sensibilités à l'endommagement de chaque technique sont alors prises en compte. Les différents cas de redondance, complémentarité et conflits sont estimés.

### **I.3.2.3. Application à l'endommagement des composites**

L'utilisation de la théorie de Dempster-Shafer est détaillée dans les travaux de Moysan et al. [181] avec deux techniques de thermographie infrarouge - SATIR (Station d'Acquisition et Traitement InfraRouge) et lock-in thermographie - appliquées à un assemblage multi-matériaux entre des composites carbone/époxy et un alliage d'aluminium. La fusion de données a été menée avec la théorie de Dempster-Shafer et des cartographies des zones de conflits ont été déterminées.

Une autre étude a implémenté la théorie de Dempster-Shafer [182] dont l'opérateur de combinaison est modifié pour un opérateur de Delmotte (défini par Delmotte et al. [183]). Cet opérateur propose un compromis entre les opérateurs conjonctifs et disjonctifs. Les

techniques de fusion ont alors permis l'identification de la porosité et de la saturation en eau dans des bétons. Des améliorations sont nécessaires sur l'estimation du module élastique.

Au-delà, sans rapport direct aux matériaux composites, les travaux de Rombault et al. [184] ont permis de résoudre la problématique de définition objective des masses de croyance de Dempster-Shafer. A partir d'une évaluation des niveaux de gris d'une image, les différentes classes sont identifiées et permettent le calcul des seuils des masses de croyances en fonction des niveaux de gris recherchés.

Enfin, Zhou et al. [185] ont utilisé 15 capteurs sur un treillis métallique afin d'étudier son endommagement. Lors de cette étude, les différents niveaux de fusion de données ont été comparés (Tableau I-2).

Tableau I-2 : Comparaison des différents niveaux de fusion [185]

Précision (%)	Sans fusion	Bas niveau	Niveau intermédiaire	Haut niveau
Moyenne	78.25	90.15	84.25	91.75
Moyenne sous perturbation	71.29	84.50	67.42	91.25
Ecart-type	1.11	0.11	8.51	0.01

Il apparait que les méthodes de fusion de haut niveau sont les plus à même de fournir une estimation précise de l'endommagement comparativement à des niveaux inférieurs et à une absence de fusion.

### I.3.3. Méthodes indéterministes pour la fusion de données

D'autres méthodes basées sur des approches statistiques sont davantage utilisées. Elles exploitent une quantité importante de données afin d'établir les lois d'évolution des systèmes étudiés. Ces méthodes sont notamment appliquées à la maintenance prédictive pour déterminer l'état de dégradation du système étudié avant sa détérioration complète. Pour être menée à bien, la maintenance prédictive requiert une évaluation des données du système ainsi que l'estimation de la durée de vie résiduelle pouvant être exprimées à l'aide de fonctions de probabilités [186]. Cette application est un cas d'étude différent de la sollicitation de fatigue qui sera détaillée dans la suite de l'étude. Néanmoins, cet exemple permet de mieux appréhender les capacités de ces méthodes pour une potentielle fusion de

données dans le domaine des contrôles non destructifs. L'évaluation des données du système est effectuée à l'aide d'outils capables de réaliser des régressions ou des classifications sur des données hétérogènes et complexes. Les outils présentant une capacité d'apprentissage sont les plus utilisés car ils sont susceptibles de s'adapter à de nouvelles configurations et donc d'extrapoler. Cet apprentissage, pour être efficace, nécessite une quantité très importante d'informations (d'où l'appellation « data driven » en anglais). De nombreuses méthodes de ce type existent dans la littérature : réseaux de neurones (pour la régression), réseaux de neurones profonds (pour la classification), machines à supports de vecteurs (notée MSV, utilisées pour la classification), arbre de classification, analyse des voisins les plus proches (k Nearest Neighbors, pour la classification), ...

#### **I.3.3.1. Méthodes pour l'estimation de la durée de vie résiduelle**

Okoh et al. [187] ont mis au point une méthode hybride basée sur plusieurs analyses statistiques afin de réduire les erreurs d'estimation de la durée de vie résiduelle sur des composants industriels (pièces de moteurs). Elle consiste en une « fusion des différentes fusions » basée à la fois sur les réseaux de neurones, les MSV et les voisins les plus proches.

L'estimation de la durée de vie résiduelle de pièces aéronautiques (système d'arrivée d'air d'un turboréacteur) a aussi été comparée en utilisant plusieurs méthodes statistiques [188]. Dans cette configuration, les MSV présentent des résultats particulièrement pertinents. Afin de compléter la comparaison des méthodes indéterministes, une approche en parallèle avec deux « machine learning » suivi d'un vote confirme l'intérêt des MSV pour l'estimation de la durée de vie résiduelle.

L'application de ces outils aux matériaux composites et au contrôle non destructif nécessite un très grand nombre d'essais pour obtenir la même précision des résultats. Ceci explique le nombre réduit d'études publiées.

#### **I.3.3.2. Réseaux de neurones pour l'évaluation de l'endommagement**

Les réseaux de neurones classiques (hors apprentissage profond et autre), aussi appelés réseaux de neurones artificiels (« artificial neural networks », ANN en anglais) ont pour but de reproduire le fonctionnement de leurs homologues biologiques. Pour cela, ils exploitent deux aspects fondamentaux :

- Un apprentissage nécessaire pour acquérir la connaissance [189]
- Les connexions entre les neurones, associées à un poids permettant la mémorisation de la connaissance.

Avec ces éléments, les neurones artificiels peuvent générer une relation mathématique entre les entrées du réseau et la sortie donnée par l'opérateur. La structure classique d'un neurone est schématisée à la figure I-24. Chaque neurone reçoit les paramètres d'entrée  $X_i$  et assigne à chacun d'entre eux un poids  $W_{ji}$ ,  $j$  correspondant au neurone considéré. La moyenne de l'ensemble est alors intégrée et fournit la sortie du neurone. La littérature n'édicte pas de règles spécifiques sur la structure des réseaux de neurones mais donne simplement des conseils comme, par exemple, prendre 3 à 4 neurones pour chaque entrée du réseau [190].

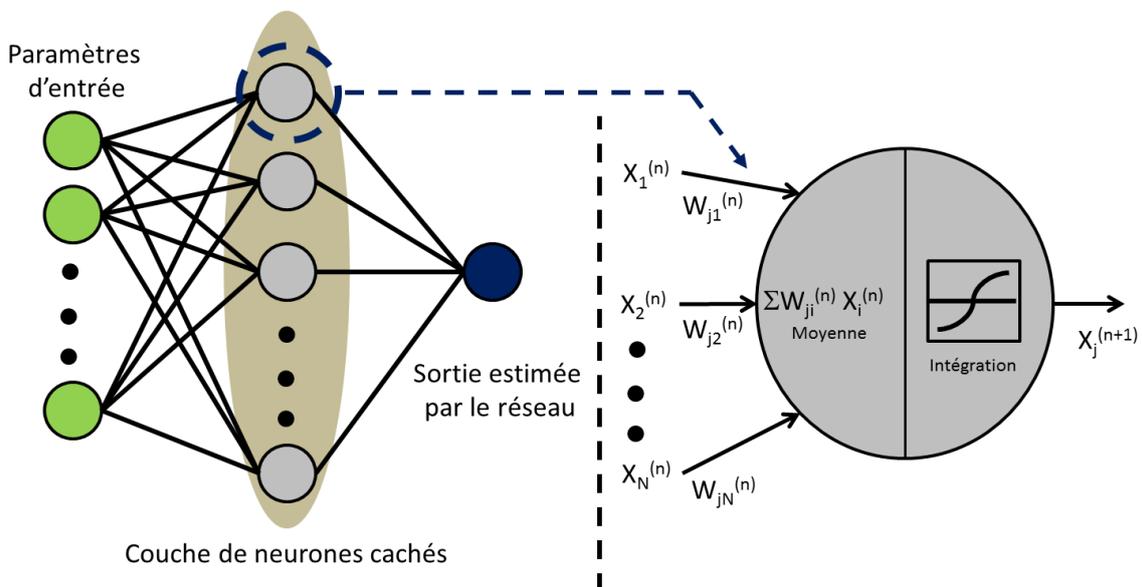


figure I-24 : Schématisation d'un réseau de neurones et du fonctionnement d'un neurone

Les différentes étapes, notamment l'attribution des poids, sont répétées par l'algorithme d'apprentissage jusqu'à réduire l'erreur du réseau. Cet entraînement est réalisé sur toutes les couches de neurones (couche de neurones cachée et neurone de sortie). Une fois le réseau entraîné, il est fortement conseillé de le tester avec un échantillon représentatif de données (généralement pris au hasard) séparées des données initiales avant la phase d'apprentissage [191]. Cet échantillon peut alors servir à l'estimation de la précision du

réseau. Une fois ces différentes étapes réalisées, le réseau peut être appliqué sur de nouvelles données.

Dans le domaine des matériaux composites, différentes contributions synthétisent les utilisations des réseaux de neurones dans de nombreux cas d'étude [191, 192]. Quelques travaux présentent un intérêt particulier.

Dans le cas de composites unidirectionnels [193], trois paramètres ont été utilisés comme entrée, afin de réaliser l'entraînement du réseau : l'angle des fibres par rapport à la direction de sollicitation, la contrainte maximale et le ratio R de sollicitation en fatigue (variant entre 0.5, 0 et -1). L'ensemble de ces données a été enregistré lors d'une campagne d'essais de fatigue sur 92 échantillons. Après une analyse paramétrique sur les paramètres du réseau, une estimation de la durée de vie résiduelle a finalement été obtenue avec une précision de plus de 90% (figure I-25).

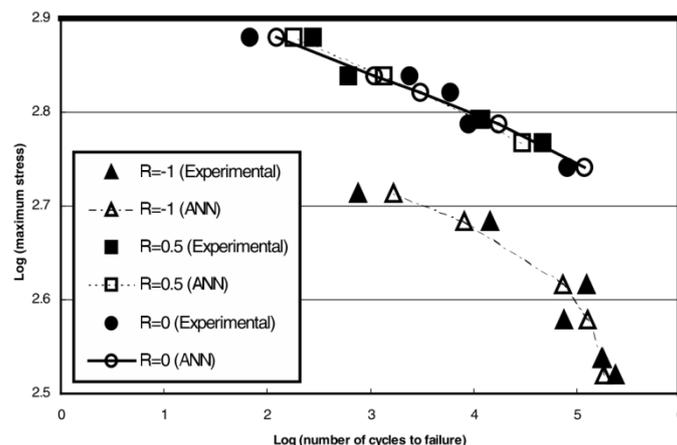


figure I-25 : Comparaison entre l'expérience et la prédiction d'un réseau de neurones pour l'estimation de la durée de vie d'un composite unidirectionnel [193]

Une démarche similaire a été appliquée à des composites stratifiés à fibre de verre et carbone et matrice époxy [194]. Le premier objectif de l'étude était de parvenir à réduire la quantité de données pour entraîner le réseau de neurones de façon efficace. Cet objectif est contre-intuitif, car la performance des réseaux de neurones requiert beaucoup de données pour la phase d'apprentissage. La réduction de la quantité d'informations pour l'apprentissage s'est systématiquement traduite par une dégradation des capacités finales du réseau. Un second objectif de l'étude était l'évaluation du nombre de cycles résiduels de

l'éprouvette en fonction des trois paramètres d'entrée du réseau. Cette méthode conduit à des erreurs faibles entre les mesures expérimentales et l'estimation du réseau.

Les réseaux de neurones ont également été utilisés dans le but d'estimer les propriétés résiduelles du béton à l'aide de différentes techniques non destructives [195]. Près de 80 échantillons de béton ont été soumis à des différentes conditions de saturation en eau. Cette campagne d'essais multi-techniques a permis la mesure de 52 paramètres, soit au total près de 12700 valeurs numériques. Trois techniques de contrôle non destructif ont été utilisées : la résistivité électrique, les ultrasons et le radar à pénétration de sol. L'ensemble des paramètres obtenus ont été fusionnés par réseau de neurones (ainsi qu'une classification par MSV). Cette fusion s'est avérée la plus pertinente que les fusions conventionnelles telles que Dempster-Shafer ou la théorie des possibilités pour l'évaluation de la résistance à la compression du béton.

Les réseaux de neurones sont des structures sensibles et non-déterministes très dépendantes des données d'entraînement. Ainsi, il convient de vérifier que l'approche de résolution par réseaux de neurones est bien adaptée au problème considéré et qu'une simple régression n'est pas suffisante. Un ensemble de bonnes pratiques est proposé par Sha et al. [192] pour éviter les erreurs fréquemment commises.

#### **I.3.4. Bilan**

Cet état de l'art permet d'identifier les aspects importants pour réaliser la fusion de données. L'obtention de données pertinentes parmi tous les paramètres d'endommagement admissibles est primordiale. Pour ce faire, un outil particulièrement utilisé est l'analyse des composantes principales. Cette méthode permet de limiter les redondances entre les paramètres. Les indicateurs d'endommagement choisis peuvent alors être utilisés afin de réaliser une fusion de données dans le but d'obtenir une estimation précise de l'endommagement. Cette fusion peut être réalisée à l'aide d'outils mathématiques simples (valeur maximale, moyenne ...) ou plus élaborés comme la théorie de Dempster-Shafer introduisant la possibilité d'une indétermination sur le résultat définitif. Enfin, une dernière approche consiste à utiliser des méthodes indéterministes et plus particulièrement les réseaux de neurones. L'application de ces méthodes au suivi de l'endommagement des

matériaux composites a jusqu'ici été plutôt limitée étant donnée la quantité d'informations nécessaire pour l'apprentissage de ces outils numériques.

## **I.4. Conclusion**

L'endommagement mécanique des matériaux composites est un phénomène complexe dont la caractérisation est délicate. Plusieurs techniques de contrôle non destructif ont prouvé leurs capacités à détecter et caractériser l'endommagement. Les résultats peuvent être présentés sous diverses formes (paramètres globaux, images, vecteurs, ...) ainsi qu'avec des coordonnées spatiales et temporelles différentes (suivi continu, résultat à un instant donné, différence entre les zones d'observations, ...).

L'émission acoustique a été largement utilisée pour détecter l'endommagement mécanique des composites. Cette technique permet également de localiser les sources acoustiques afin d'identifier les zones les plus endommagées de la structure étudiée. A l'aide d'une analyse multiparamétrique, il est possible de classer les émissions acoustiques suivant le mécanisme qui en est à l'origine. Toutefois, cette méthode n'est pertinente qu'en cas de défauts évolutifs sous diverses sollicitations (mécanique, thermique, ...).

La thermographie infrarouge peut être utilisée sous deux formes : passive et active. La forme passive est appliquée classiquement dans le cadre d'essais de fatigue afin de caractériser l'endommagement des composites. La forme active est, quant à elle, davantage utilisée dans le but de détecter des défauts sur des pièces au repos (inclusions, macro-délaminage, porosités). Une limitation majeure de cette technique est son caractère surfacique.

La corrélation d'images numériques permet également le suivi continu de la propagation de l'endommagement et la localisation des zones les plus sollicitées (concentration des contraintes). De nouveau, une limitation significative de cette technique est le caractère surfacique des résultats obtenus.

Les ultrasons (C-scan, onde de Lamb) permettent une analyse plus profonde de l'endommagement des composites sous ou hors contraintes. Les paramètres obtenus peuvent alors être utilisés afin de localiser et caractériser l'état de dégradation du matériau

dans le volume. Cependant, le monitoring en temps réel ou la détection de micro-endommagements développés dans le matériau ne sont pas possibles.

Les autres méthodes (courant de Foucault, shearographie, piézorésistivité, ...) présentées ont également des capacités de caractérisation de l'endommagement des composites, mais aussi des limites qui leur sont propres (analyse surfacique, matériau conducteur, complexité de mise en œuvre...).

Chaque méthode présente ainsi des limitations ne permettant pas une évaluation précise et complète de l'endommagement. Malgré la variabilité des résultats propres à chaque technique, la mise en place d'une approche hybride présente un intérêt certain pour évaluer l'état de santé du matériau dans son intégralité.

L'approche multi-technique engendre une problématique de gestion des données enregistrées. La multiplicité des indicateurs peut être gérée à l'aide d'algorithmes de classification tels que l'analyse en composantes principales. Les indicateurs résultants peuvent alors servir de base à une stratégie de fusion de données équilibrée entre la complémentarité, la redondance et la gestion des conflits entre les techniques. Cette fusion de données peut être réalisée à l'aide de plusieurs méthodologies comme la théorie de Dempster-Shafer ou encore des méthodes basées sur une phase d'apprentissage comme les réseaux de neurones artificiels.

Cette approche est susceptible de conduire à un diagnostic précis et fiable de l'état d'endommagement du matériau, et même à une évaluation de sa durée de vie résiduelle en développant et adaptant des outils de maintenance prédictive.

## **II. Matériau et méthodes expérimentales**

Le chapitre II a pour objet la présentation du matériau utilisé et des dispositifs et protocoles expérimentaux mis en œuvre. Dans un premier temps, le composite aéronautique choisi comme support de l'étude sera caractérisé en termes de propriétés mécaniques et physiques. Les bancs expérimentaux conçus et mis en œuvre dans le cadre de cette étude seront ensuite décrits. Le premier banc permet d'évaluer l'endommagement directement sur la machine de fatigue. Le second est dédié à la réalisation de mesures ultrasonores C-scan en transmission à l'aide de capteurs à immersion.

Un essai multi-instrumenté d'auto-échauffement par paliers (blocs) de fatigue en traction sera ensuite défini. Le protocole adopté permet un suivi continu sous contrainte et hors contrainte de la dégradation du matériau. La méthodologie appliquée à chaque technique de contrôle non destructif sera détaillée sur le plan expérimental avec les traitements de données associés. Les paramètres pertinents pour l'évaluation de l'endommagement seront alors définis.

Ces travaux conduisent à mettre en œuvre certaines méthodes inédites pour réaliser le suivi de l'endommagement, aussi bien en thermographie infrarouge (méthode de traitement des données dans les domaines permanents et transitoires), en émission acoustique (nouvelle méthode de localisation en 2D des événements acoustiques), qu'en analyse ultrasonore (méthodologie de caractérisation hors contrainte de l'endommagement).

La finalité est d'obtenir des résultats d'imageries homogènes à l'échelle du mm<sup>2</sup> pouvant être ultérieurement comparés entre les différentes techniques (chapitre III) et aboutir in fine à une caractérisation complète de l'endommagement.

## **II.1. Caractérisation du matériau composite**

### **II.1.1. Elaboration**

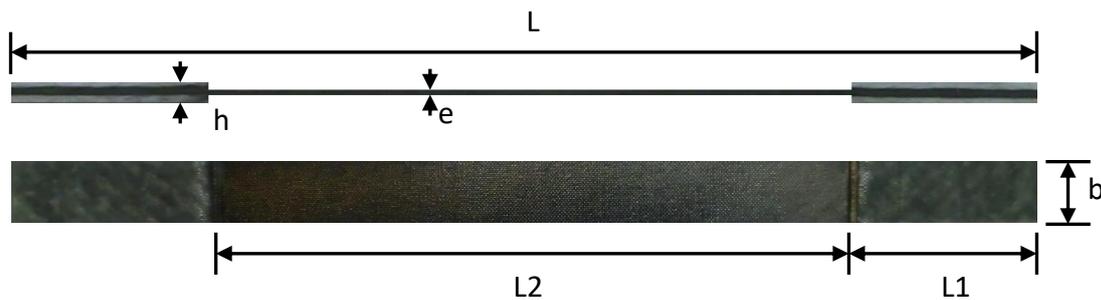
Le matériau de base retenu pour cette étude est un pré-imprégné unidirectionnel composé de fibres de carbone à haute résistance et de résine époxy. Ce matériau (Hexply M79/34%/UD300/CHS commercialisé par HEXCEL) est classiquement utilisé dans le domaine de l'aéronautique. Ses caractéristiques sont précisées au Tableau II-1.

Tableau II-1 : Propriétés mécaniques et physiques du pré-imprégné (données Hexcel)

Taux massique de résine (en %)	34
Densité nominale de la résine (en g/cm <sup>3</sup> )	1.15
Densité nominale de fibre (en g/cm <sup>3</sup> )	1.81
Contrainte à rupture longitudinale (en MPa)	2130
Module longitudinal (en GPa)	119
Contrainte à rupture transversale (en MPa)	36
Module transversal (en GPa)	7.2

La mise en œuvre est réalisée à l'aide d'une presse hydraulique et de deux plaques métalliques planes et parallèles faisant office de moule et assurant une épaisseur uniforme du stratifié fabriqué. La pression entre les deux plaques métalliques chauffantes est de 210 bars. Pour assurer un taux de fibres volumique optimal de 66%, typique des applications aéronautiques, un empilement de 8 plis est nécessaire. Des talons sont intégrés à la plaque, avec des plis de pré-imprégné (tissu sergé) en fibre de verre orientés à  $\pm 45^\circ$ . Des plaques composites de dimensions 470x310x2mm<sup>3</sup> sont ainsi fabriquées, au sein desquelles sont découpées des éprouvettes d'essai parallélépipédiques (dimensions précisées à la figure II-1).

La caractérisation en statique (5 éprouvettes), en fatigue (12 éprouvettes) et les essais multi-techniques (4 éprouvettes) seront réalisés sur des éprouvettes issues d'une même plaque de matériau composite.



L	Longueur totale (mm)	250
L1	Longueur des talons (mm)	50
L2	Distance entre les talons (mm)	150±1
e	Epaisseur (mm)	2±0.2
h	Epaisseur avec talons (mm)	6
b	Largeur (mm)	20±0.3

figure II-1 : Dimensions de l'éprouvette d'essai

## II.1.2. Propriétés physiques et mécaniques du matériau composite

La séquence d'empilement  $[-45/90/45/0]_s$  permet l'obtention d'un composite quasi-isotrope transverse symétrique [82, 196, 197]. Plusieurs échantillons ont été utilisés pour mesurer la masse volumique du matériau ( $1.56\text{g/cm}^3 \pm 0.04\text{g/cm}^3$ , selon la norme NF EN ISO 1183-1). Ces derniers ont servi, par la suite, à des essais de calcination à  $625^\circ\text{C}$  sous azote afin de déterminer le taux de fibres volumique réel du matériau (NF EN ISO 1172), estimé à 62.4% ( $\pm 3,3\%$ ).

La caractérisation thermique du composite a été également réalisée, selon la norme NF EN ISO 22007 (Tableau II-2). La conductivité thermique du matériau a été déterminée par analyse de la distribution des températures en régime permanent lorsque l'éprouvette est soumise à un flux de chaleur constant. La capacité thermique est mesurée à l'aide d'un calorimètre et de la méthode dite de « calorimétrie à chute ». La diffusivité thermique est évaluée à l'aide des deux paramètres précédents.

Tableau II-2 : Propriétés thermiques du composite quasi-isotrope

$\lambda$ conductivité thermique (en W/mK)	1.59
Cp capacité thermique (en J/(K·Kg))	571
$\alpha$ diffusivité thermique (en $\text{m}^2/\text{s}$ )	$1.78 \cdot 10^{-6}$

La caractérisation mécanique en traction a été réalisée selon la norme NF EN ISO 527-4. Le Tableau II-3 synthétise les caractéristiques en traction statique du composite quasi-isotrope.

Tableau II-3 : Propriétés mécaniques en traction du composite quasi-isotrope

	Moyenne	Ecart-type
Module d'Young (GPa)	50.7	3.7
Contrainte à rupture (MPa)	565	48.2
Déformation à rupture (%)	3.5	0.3

Les lois de comportement en traction uniaxiale de cinq éprouvettes issues d'une même plaque sont illustrées à la figure II-2. Ces courbes présentent une reproductibilité satisfaisante avec une faible dispersion (au maximum 10% de variation de la contrainte maximale à rupture) sachant que les éprouvettes ont été choisies avec des positions adjacentes au sein de la plaque de composite.

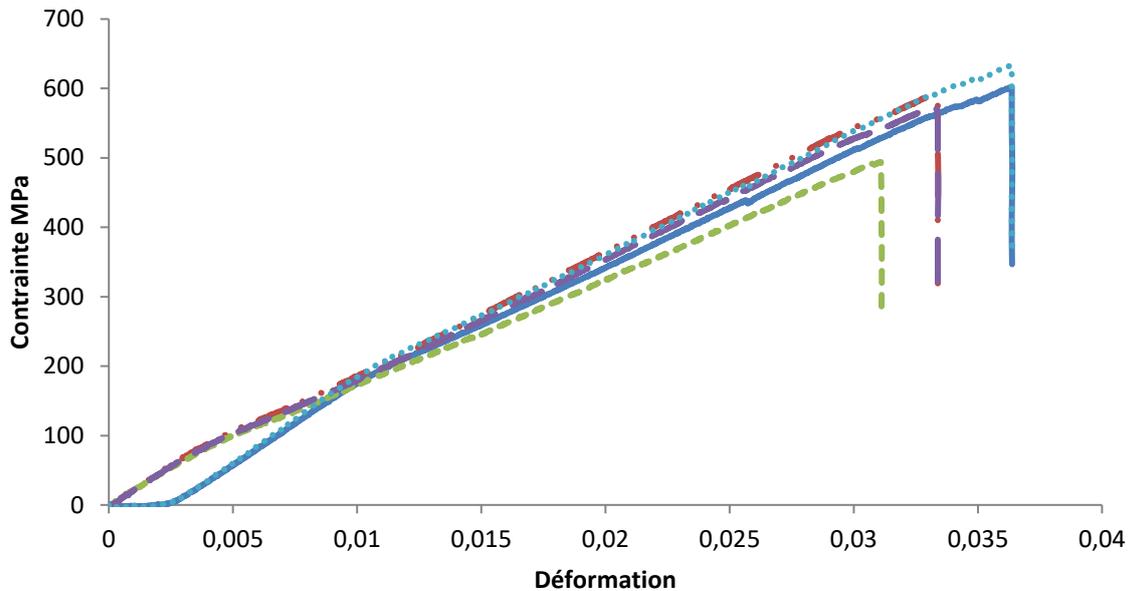


figure II-2 : Lois de comportement en traction de 5 échantillons issus d'une même plaque de composite

La caractérisation mécanique en fatigue (traction-traction) du composite est réalisée en construisant une courbe de Whöler (norme NF EN ISO 1300) avec un critère d'arrêt basé sur une chute de rigidité du matériau de 20%. Connaissant la contrainte à rupture en traction, il est possible de définir les différents niveaux de chargement pour tracer la courbe de Wöhler. Quatre niveaux de chargements sont appliqués sur trois éprouvettes (90%, 80%, 70% et 60% de la charge à rupture en statique ou UTS (Ultimate Tensile Stress)). Les sollicitations sont générées avec un ratio  $R$  ( $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$ ) de 0.1. Afin de s'assurer de la validité des essais d'un point de vue thermique, la fréquence de sollicitation est fixée à 4Hz. Cela permet de ne pas dépasser une augmentation de 10°C de la température de l'éprouvette (Tableau II-4).

Tableau II-4 : Augmentation de la température de l'éprouvette pour différents chargements de fatigue à 4Hz

Chargement	90%	80%	70%	60%
Augmentation de température (°C)	8.7	8.2	7.2	4.3

La courbe de Wöhler ainsi déterminée expérimentalement est présentée à la figure II-3. Les éprouvettes sollicitées à 60% de la charge à rupture ont conservé une rigidité de plus de 80% de la valeur initiale jusqu'à  $5 \cdot 10^6$  cycles. Cette valeur de 60% UTS est considérée comme étant la limite d'endurance du matériau.

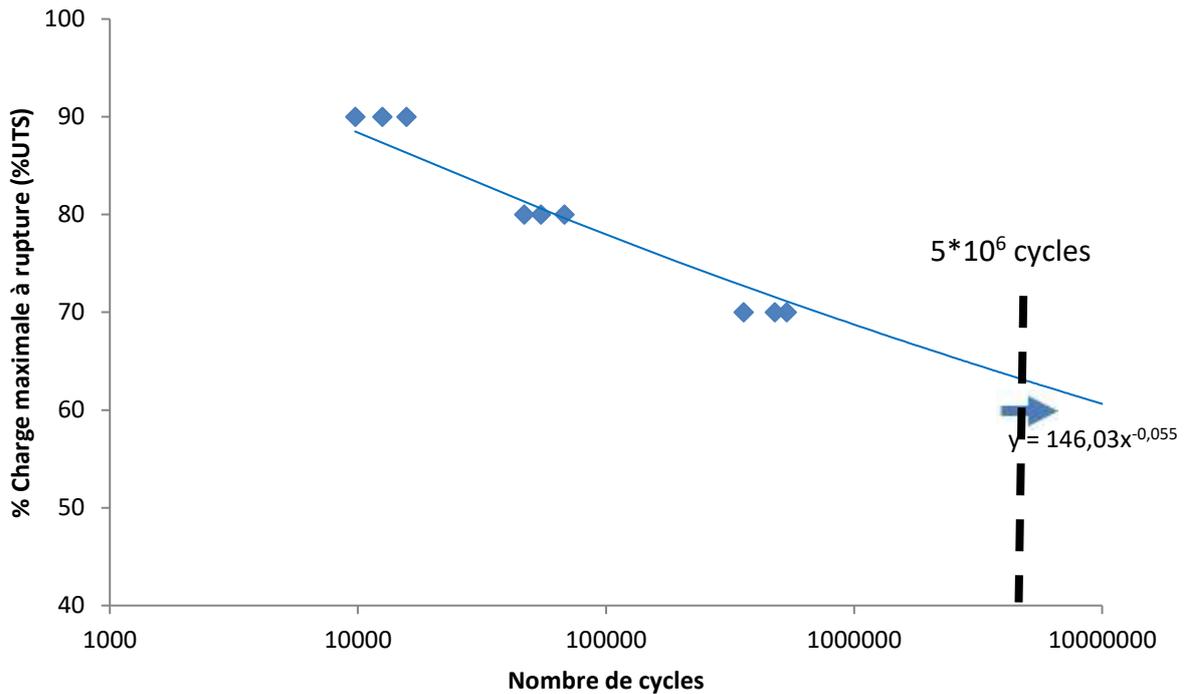


figure II-3 : Courbe de Wöhler du composite carbone/époxy [-45/90/45/0]<sub>s</sub> (R=0.1, f=4Hz)

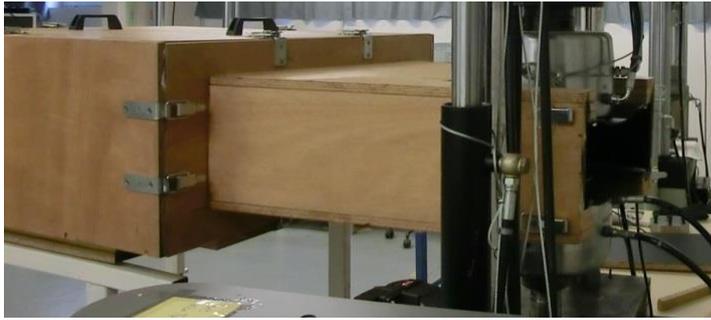
## II.2. Conception des bancs expérimentaux

Afin de réaliser des mesures in-situ précises et fiables, une enceinte d'essai adaptable à la machine de fatigue est réalisée afin d'isoler la zone d'étude des perturbations du milieu environnant. Le second banc conçu consiste en l'amélioration du dispositif C-scan existant au laboratoire afin de pouvoir travailler en transmission.

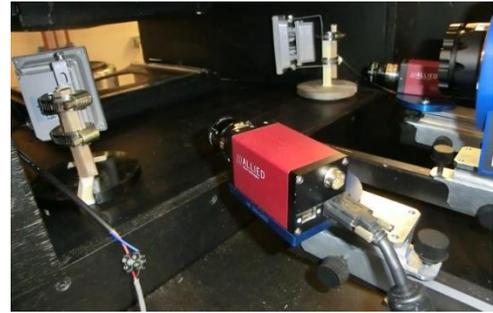
### II.2.1. Enceinte d'isolation in-situ

L'enceinte est constituée de deux parties : une enceinte principale permettant des mesures thermiques hors contraintes et un module d'extension adapté à la machine de fatigue pour la réalisation in-situ des mesures d'émission acoustique, de thermographie infrarouge passive et de corrélation d'images numériques (figure II-4).

Ce dispositif permet d'isoler l'éprouvette des perturbations thermiques, acoustiques ou optiques extérieures. De plus, des cloisons sont disposées à l'intérieur de l'enceinte afin d'isoler les caméras de thermographie infrarouge et de corrélation d'images numériques.



(a)



(b)

figure II-4 : Enceinte adiabatique positionnée sur la machine de fatigue (a) vue externe (b) vue interne

Afin de réaliser le suivi de l'endommagement, la caméra thermique est placée au centre de l'enceinte avec les caméras de corrélation d'images numériques de part et d'autre afin de pratiquer la stéréo-corrélation d'images numériques. La seule source de lumière est introduite avec des lampes de lumière blanche froide (leds) placées au plus près de l'échantillon. Cet éclairage est nécessaire afin d'évaluer les déformations de la surface de l'éprouvette pour la corrélation d'images numériques.

Le principal inconvénient de cette enceinte d'isolation est l'utilisation de la même face de l'échantillon pour réaliser les essais de corrélation d'images et de thermographie infrarouge passive.

Cette enceinte a été conçue et réalisée dans la perspective d'une instrumentation multi-technique non destructive. Ainsi, la problématique d'encombrement et la gestion optimisée des techniques de contrôle non destructif a été prise en compte dès la phase de conception.

### II.2.2. Amélioration du système C-scan ultrasonore

Un système C-scan existant, initialement opérationnel en mode pulse-écho, a été amélioré pour permettre une analyse en transmission ainsi qu'une augmentation de la taille de la zone d'étude.

La conception du dispositif a été réalisée sur le logiciel de CAO Catia pour dimensionner et valider les différentes fonctionnalités désirées (figure II-5).

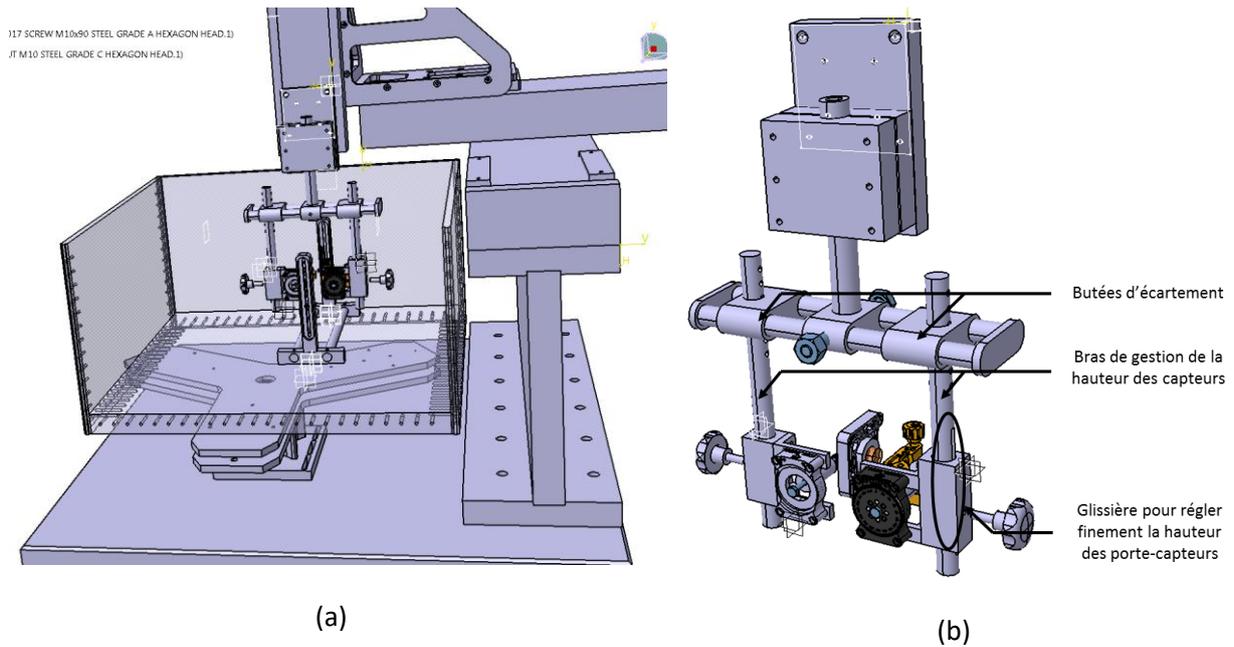


figure II-5 : Schéma du banc de mesure par ondes ultrasonores (a) ensemble du banc (b) zoom

La mobilité des capteurs permet de réaliser les mesures en transmission mais aussi de préserver les capacités précédentes du dispositif (analyse en pulse-écho). Il est également possible de scanner l'éprouvette dans son sens horizontal ou vertical. La configuration définitive permet l'étude en pulse écho d'une surface de 40x40cm dans un plan parallèle au fond de la cuve. Dans un plan vertical, il est possible de scanner une surface de 40x20cm (figure II-6).

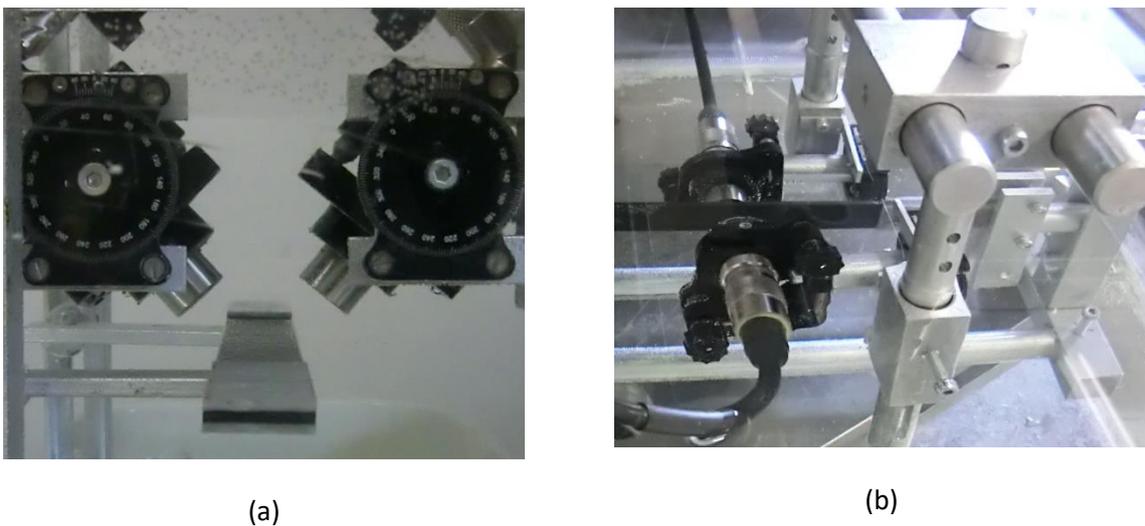


figure II-6 : Dispositif C-scan dans différentes configurations (a) en mode réflexion (b) en mode transmission normale

Ces deux dispositifs expérimentaux sont cruciaux pour la conduite des essais. L'enceinte d'isolation est indispensable à la mise en œuvre de l'approche multi-technique afin d'enregistrer les données des méthodes de suivi en continu sous sollicitation mécanique. Le système C-scan permet une mesure ultrasonore plus aisée dans les matériaux composites que celle initialement disponible. Une autre contrainte de la phase de conception était d'unifier au maximum la zone d'observation afin de faciliter, par la suite, le recalage spatial des données numériques pour la mise en œuvre de la fusion des données enregistrées.

### **II.3. Réalisation des essais multi-instrumentés**

Une multi-instrumentation non destructive est mise en œuvre lors des essais d'auto-échauffement par paliers de fatigue. Cette méthode permet de réduire la durée des essais et le nombre d'éprouvettes nécessaires pour mener à bien une caractérisation de l'endommagement en fatigue.

La sollicitation mécanique est suivie en direct et en continu avec trois techniques : émission acoustique, thermographie passive, corrélation d'images numériques. L'acquisition est réalisée dans l'enceinte d'isolation précédemment décrite. L'endommagement est également évalué hors contrainte par ultrasons et acousto-ultrasons.

#### **II.3.1. Essais d'auto-échauffement en fatigue**

L'instrumentation multi-technique non destructive mise en œuvre est appliquée à des essais de fatigue par auto-échauffement à une fréquence de sollicitation de 4Hz et un ratio  $R=0.1$  (identiques à ceux utilisés précédemment pour déterminer la courbe de Wöhler).

Pour réaliser un essai d'auto-échauffement, des blocs de chargements successifs sont appliqués à l'éprouvette. La contrainte maximale est augmentée de 10% d'un bloc de fatigue à l'autre (Tableau II-5).

Tableau II-5 : Caractéristiques des différents niveaux de chargement mécanique appliqués

Taux de charge en % UTS	90%	80%	70%	60%	50%	40%	30%	20%	10%
R_ratio	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Charge max kN	23.7	22.4	21.1	19.7	18.4	17.1	15.8	14.5	13.2
Charge min kN	2.4	2.2	2.1	2.0	1.8	1.7	1.6	1.4	1.3
Charge moy kN	13.0	12.3	11.6	10.9	10.1	9.4	8.7	8.0	7.2
Amplitude kN	10.7	10.1	9.5	8.9	8.3	7.7	7.1	6.5	5.9

La dernière variable de la sollicitation en auto-échauffement est le nombre de cycles pour chaque bloc de fatigue. Lors des essais, il est nécessaire de s'assurer que le domaine transitoire soit passé et la température de stabilisation atteinte. Des essais réalisés afin d'estimer le nombre de cycles nécessaires pour valider ce critère permettent de fixer un bloc de fatigue à 3000 cycles (750s). Cette durée est suffisante pour une évaluation quasi-certaine des domaines transitoires et permanents pour chaque bloc de fatigue (figure II-7).

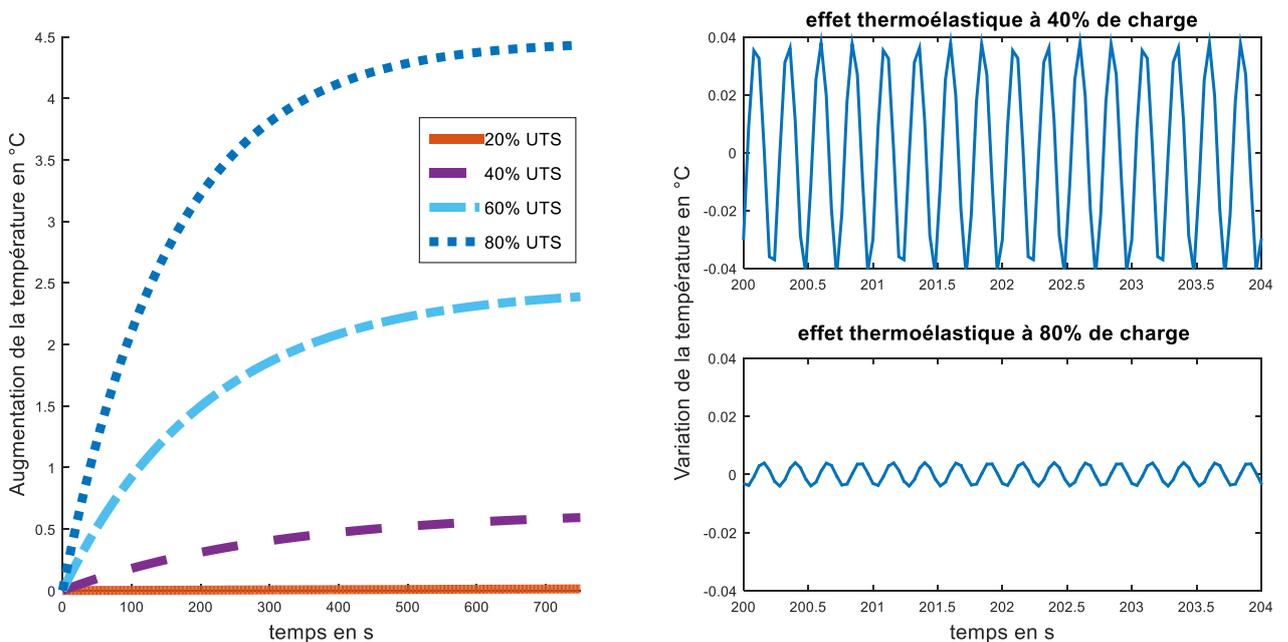


figure II-7 : Augmentation de température moyenne de l'éprouvette composite sur 3000 cycles

### II.3.2. Protocole de mesures multi-techniques

Les cas d'application des différentes techniques non destructives sont présentés dans l'ordre d'exécution des essais.

Dans le cas d'une éprouvette non-endommagée, une caractérisation initiale est réalisée par acousto-ultrasons à l'aide de sources acoustiques artificielles se propageant sous forme d'ondes de Lamb obtenues par conversion de modes. Cette première méthode est complétée par une analyse ultrasonore à l'aide du banc d'essai C-scan amélioré. Dans les deux cas, l'éprouvette est libre de charge.

Chaque bloc de fatigue peut alors être divisé en trois temps de caractérisation : avant, pendant et après la sollicitation mécanique.

Avant le bloc de fatigue, une caractérisation de l'état d'endommagement est réalisée à l'aide des acousto-ultrasons. Cette évaluation est complétée par une analyse des ondes de Lamb lorsque l'éprouvette est sous contrainte sur le banc de fatigue.

Différentes techniques de contrôle non destructif sont ensuite appliquées pendant l'essai de fatigue :

- Emission acoustique : l'enregistrement des données acoustiques est réalisé à l'aide de deux capteurs sur l'éprouvette. La localisation des sources acoustiques est réalisée à l'aide de plusieurs réseaux de neurones.
- Thermographie infrarouge passive : l'acquisition des données est réalisée dans l'enceinte d'isolation. Les informations obtenues sont utilisées afin de réaliser le suivi continu sur l'ensemble du bloc de fatigue considéré.
- Corrélation d'images numériques : cette technique est utilisée en stéréo-corrélation. La caractérisation de l'endommagement est menée en continu à l'aide des champs de déformation et de l'aire de l'hystérésis.

Suite à la sollicitation mécanique, l'éprouvette étant encore sous contrainte, une seconde analyse des ondes de Lamb est effectuée. La comparaison avec les données enregistrées avant le bloc de fatigue permet d'évaluer l'endommagement induit par la sollicitation mécanique.

Enfin, une dernière caractérisation est réalisée hors contrainte par ultrasons C-scan dans l'épaisseur de l'éprouvette.

Cette méthodologie est itérative. Elle est synthétisée sur la figure II-8.

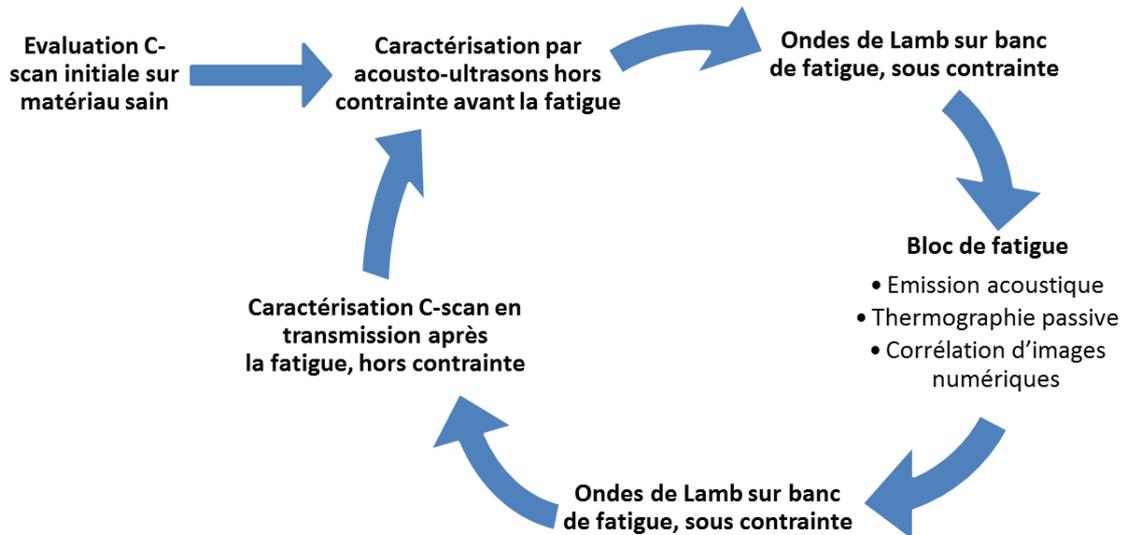


figure II-8 : Schéma récapitulatif des différentes méthodes CND utilisées pendant l'essai

## II.4. Méthodes non destructives utilisées

Dans cette partie sont décrites les méthodologies expérimentales mises en œuvre ainsi que les paramètres utilisés afin de caractériser l'endommagement. Un objectif important est l'application de chaque technique dans un cadre optimal, i.e. de telle sorte qu'il n'y ait pas de perturbations entre les techniques lors de la réalisation des essais.

### II.4.1. Thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge permet le suivi de l'endommagement mécanique sous contrainte. Les données enregistrées conduisent à la caractérisation de l'endommagement et l'identification des zones les plus dégradées. Ces résultats correspondent aux projections des événements thermiques sur la surface de l'éprouvette.

#### II.4.1.1. Dispositif expérimental

La caméra (CEDIP JADE) utilisée est de type matricielle avec un détecteur photovoltaïque MW 50mm de 240x320 pixels, de bande spectrale de 3.7-4.8 $\mu$ m (infrarouge moyen) et une résolution spatiale de 1 $\mu$ m. Le détecteur convertit le flux incident en tension, puis des courbes d'étalonnage permettent la transcription de ces tensions en cartographies thermiques. Le logiciel utilisé (Altair) assure l'acquisition et la visualisation en direct des images thermiques.

Lors des essais de fatigue, la thermographie a été implémentée en mode passif. Les mesures sont réalisées dans l'enceinte d'isolation précédemment décrite (§II.2.1). Ce banc d'essai permet d'éviter les perturbations thermiques extérieures (figure II-9).

La fréquence d'acquisition est fixée à 25Hz, permettant de réaliser le suivi de chaque cycle de chargement mécanique auquel est soumis le matériau. Ce monitoring pendant la sollicitation mécanique permet de définir des paramètres d'endommagement propres à chaque régime thermique (transitoire et permanent).

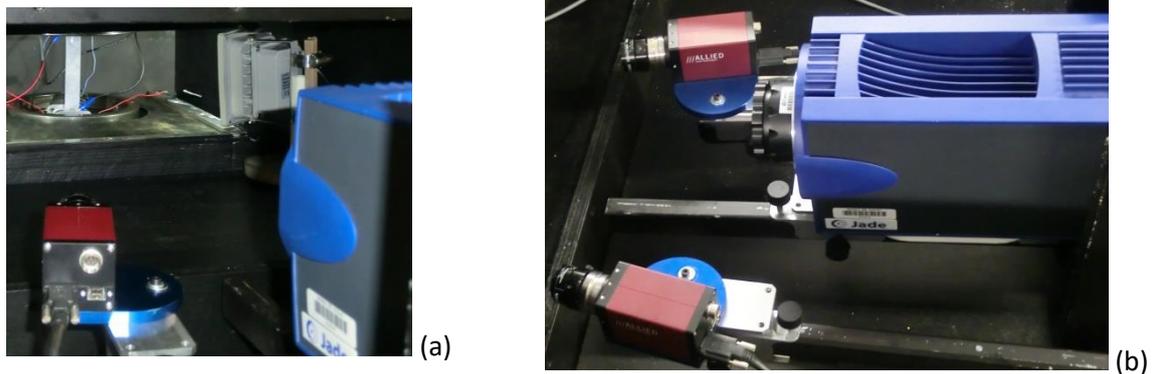


figure II-9 : Positionnement de la caméra infrarouge en mode passif (a) vue de l'éprouvette, (b) vue du dessus

#### II.4.1.2. Fonction de régression thermique sur un bloc de fatigue

Pour chaque chargement mécanique, le comportement thermique du matériau présente deux régimes : l'un transitoire et l'autre permanent. Le domaine transitoire, peut être modélisé en considérant une évolution de la température définie par l'équation (II.1), modèle initialement introduit par Krapez et al. [198] :

$$T(t) = T_0 + \Delta T \cdot f \cdot t + T_1 \sin(2\pi f t + \varphi_1) + T_2 \sin(2\pi 2f t + \varphi_2) \quad (II.1)$$

avec :

- $T_0$  la température du début de l'essai en °C,
- $\Delta T$  l'augmentation moyenne de la température par cycle en °C,
- $f$  la fréquence de sollicitation mécanique en Hz,
- $T_1$ , en °C et  $\varphi_1$  en °, l'amplitude et la phase du mode fondamental de la sollicitation mécanique,
- $T_2$ , en °C, et  $\varphi_2$ , en °, l'amplitude et la phase de la première harmonique.

Les deux premiers termes de l'équation  $(T_0 + \Delta T \cdot f \cdot t)$  permettent un suivi de la température moyenne de l'échantillon considéré. L'effet thermoélastique induit par la sollicitation mécanique est modélisé à l'aide des deux sinus dont les pulsations sont fixées (fréquence de sollicitation mécanique et première harmonique). Ces derniers éléments complètent la fonction utilisée comme support à la régression.

Dans la littérature, cette modélisation a été utilisée pour évaluer l'endommagement généré sur quelques cycles de fatigue (10 à 100 cycles). Cependant, elle ne permet pas de prendre en compte le comportement complet du matériau depuis le domaine transitoire jusqu'au domaine permanent. Pour pallier ce problème, Crupi et al [152, 199] ont proposé une autre modélisation limitée au comportement global du matériau sans prendre en compte la thermoélasticité. Dans ce cas, l'évolution de la température s'exprime selon l'équation (II.2).

$$T(N) = T_0 + T_{stab} \cdot (1 - e^{-N/\tau_N}) \quad (II.2)$$

avec :

- $T_0$  la température du début de l'essai en °C,
- $T_{stab}$  la température de stabilisation du niveau de chargement considéré,
- $N$  le nombre de cycles,
- $\tau_N$  une constante en nombre de cycles pour parvenir à la stabilisation.

Afin d'obtenir une seule modélisation prenant en compte à la fois la température moyenne et l'effet thermoélastique de la sollicitation mécanique, il est nécessaire de vérifier la compatibilité de l'équation (II.2) avec à l'équation (II.1). Pour ce faire, une uniformisation des variables entre les deux équations est nécessaire. Ainsi, les premiers termes de l'équation (II.2) sont reformulés avec la variable temporelle, d'où :

$$T(t) = T_0 + T_{stab} \cdot (1 - e^{-tf/\tau_s}) \quad (II.3)$$

Dans cette nouvelle formulation  $\tau_s$  est une constante de temps et non plus une constante de cycles de fatigue.

L'équation (II.1) est appliquée au début de chaque sollicitation mécanique soit un temps relativement court, de l'ordre de quelques secondes. Ainsi, un développement limité de l'exponentielle à l'ordre 1 de l'équation (II.3) permet d'obtenir la relation suivante :

$$T(t) = T_0 + \frac{T_{stab}}{\tau_s} \cdot f \cdot t \quad (II.4)$$

Le rapport  $\frac{T_{stab}}{\tau_s}$  correspond à l'augmentation de température pendant la durée nécessaire à l'obtention du domaine permanent. Il est ainsi possible d'identifier les coefficients de l'équation (II.4) avec les deux premiers termes de l'équation (II.1). Cette identification permet de vérifier que le modèle appliqué lors des premiers cycles de fatigue peut être généralisé au régime permanent à l'aide du modèle de Crupi. L'effet thermoélastique est alors ajouté avec les deux sinus de pulsation fixe (mode fondamental de la sollicitation et première harmonique).

La fonction de régression développée dans cette étude est basée sur les deux premiers modèles présentés pour prendre en compte les trois comportements thermiques (transitoire, permanent et thermoélastique) selon l'équation (II.5).

$$T(t) = T_0 + T_{stab} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_s}}\right) + T_1 \sin(2\pi f t + \varphi_1) + T_2 \sin(2\pi 2f t + \varphi_2) \quad (II.5)$$

Cette fonction de régression est appliquée à l'échelle du mm<sup>2</sup> pour les différents niveaux de chargement considérés. Les coefficients de corrélation obtenus sont de l'ordre de R<sup>2</sup>=0.9 au minimum (figure II-10). Les différents paramètres de cette régression  $T_{stab}, T_1, \varphi_1, T_2, \varphi_2$  sont alors utilisés afin de générer des cartographies de l'endommagement du matériau.

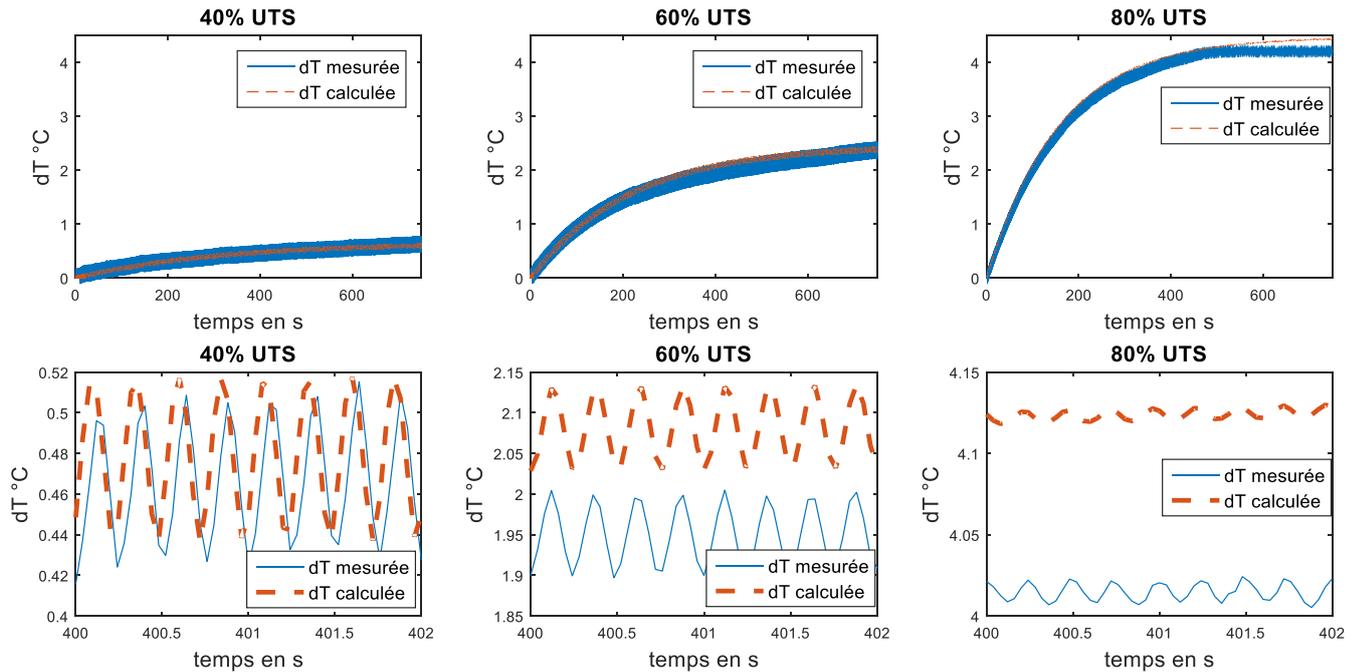


figure II-10 : Comparaison entre la température moyenne mesurée et la température calculée par régression pour différents niveaux de chargement mécanique

## II.4.2. Corrélation d'images numériques

La corrélation d'images numériques permet la mesure des champs de déplacements et de déformations à la surface du matériau sous chargement mécanique. Cette technique sans contact utilise des caméras optiques de haute résolution et permet des mesures en 2D (une seule caméra) ou 3D (avec au moins deux caméras). En complément des cartographies de déformations, l'endommagement est également caractérisé à l'aide de l'aire de l'hystérésis (contrainte-déformation).

### II.4.2.1. Dispositif expérimental

La caméra thermique étant placée perpendiculairement à la surface de l'échantillon, il est nécessaire, pour la corrélation d'images, d'utiliser deux caméras CCD en mode stéréoscopique positionnées à gauche et à droite de la caméra infrarouge (figure II-11).

L'éclairage du mouchetis est assuré par deux spots led de 20W contrôlés par une alimentation stabilisée en courant continu. La lumière est continue, blanche, froide, pour éviter toute perturbation de la mesure (variation de l'intensité lumineuse, chauffage, ...) durant les essais de fatigue. Ces spots sont positionnés dans la seconde partie de l'enceinte

et placés au plus près des bords pour ne pas apparaître dans le champ de vision des différentes caméras. L'enceinte d'isolation permet ici de protéger les mesures des perturbations lumineuses extérieures.

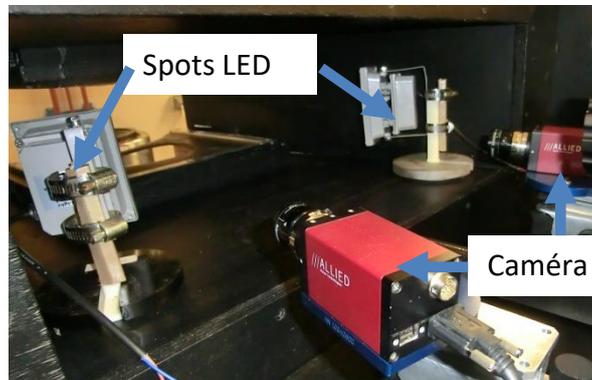


figure II-11 : Positionnement des caméras et spots de corrélation d'images à l'intérieur de l'enceinte d'isolation

L'acquisition physique des images est réalisée avec deux caméras (ALLIED Vision, 4 mégapixels, vitesse d'acquisition à 16Hz en pleine résolution, plus si l'image est réduite). L'enregistrement des images et les calculs de corrélation sont, respectivement, effectués avec les logiciels Vic Snap et Vic 3D (Correlated Solution).

Le logiciel Vic 3D permet de calculer le tenseur des déformations sur la surface étudiée (matrice carrée d'ordre deux). Les déformations principales sont alors les valeurs propres de ce tenseur. L'intérêt principal de ces résultats est la prise en compte des déformations dans le sens longitudinal et transversal ainsi que les deux autres constantes du tenseur. Ces deux paramètres sont un complément pour la caractérisation de l'endommagement ne se limitant pas aux déformations classiquement étudiées.

La zone d'observation étudiée ne requiert pas l'utilisation des 4 mégapixels disponibles. Ceci permet alors d'augmenter la fréquence d'acquisition et de la fixer à 25Hz comme pour la thermographie infrarouge. Cette fréquence permet à nouveau d'obtenir un suivi cycle par cycle de la charge mécanique ; néanmoins le détail de chaque cycle n'est pas disponible.

La qualité et la précision du calcul de corrélation d'images dépendent aussi du mouchetis déposé à la surface du matériau. Il est réalisé manuellement en déposant une couche de peinture noire puis en projetant un mouchetis blanc sur l'éprouvette. Le résultat obtenu est homogène sur l'ensemble de la zone d'étude et ne perturbe pas l'enregistrement des données de thermographie infrarouge (figure II-12).

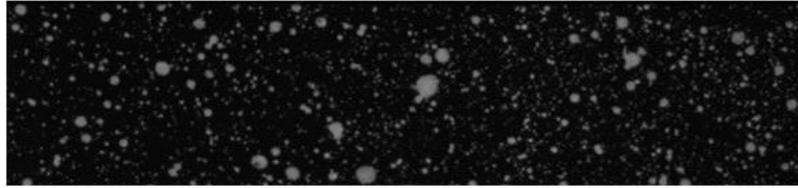


figure II-12 : Exemple de mouchetis sur l'éprouvette en composite

Le même mouchetis est utilisé pour l'ensemble de l'essai de fatigue. Il n'est pas dégradé d'un bloc de chargement à un autre.

#### II.4.2.2. Calcul de l'aire l'hystérésis

La fréquence d'acquisition des caméras de corrélation d'images numériques ne permet pas d'évaluer correctement l'aire de l'hystérésis à chaque cycle de fatigue. Pour résoudre cette difficulté, il est nécessaire de générer un cycle fictif en superposant les données de quatre cycles successifs correspondant à une durée d'une seconde d'enregistrement (figure II-13).

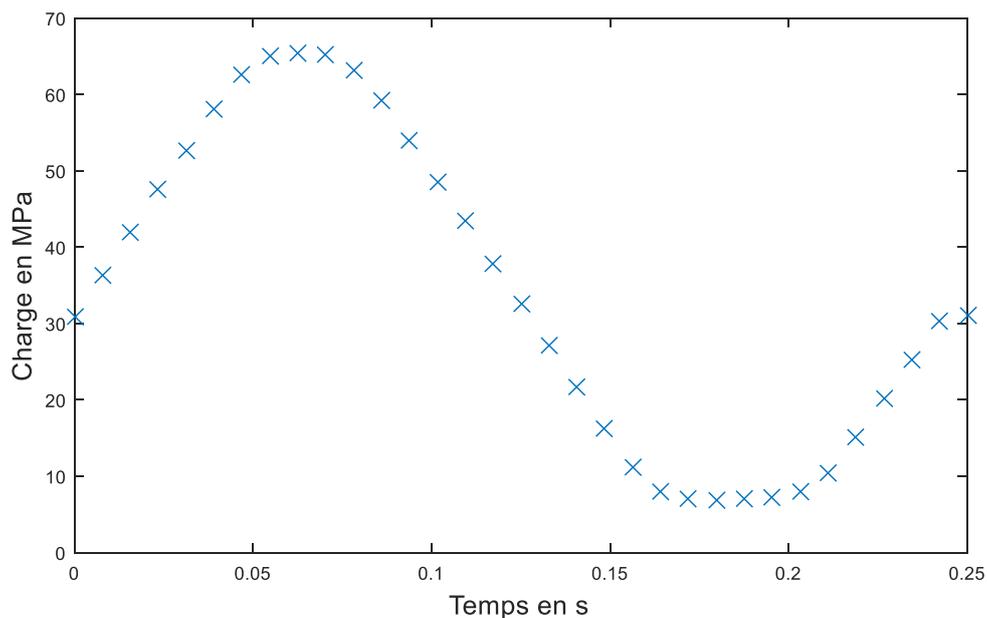


figure II-13 : Cycle de chargement reconstitué à partir d'une seconde d'enregistrement (4 cycles)

Connaissant le chargement mécanique et les déformations, il est alors possible de tracer l'hystérésis et de déterminer ses paramètres (aire, pente). A l'échelle de l'éprouvette (valeur moyenne), l'endommagement induit une augmentation de l'aire de l'hystérésis (figure II-14).

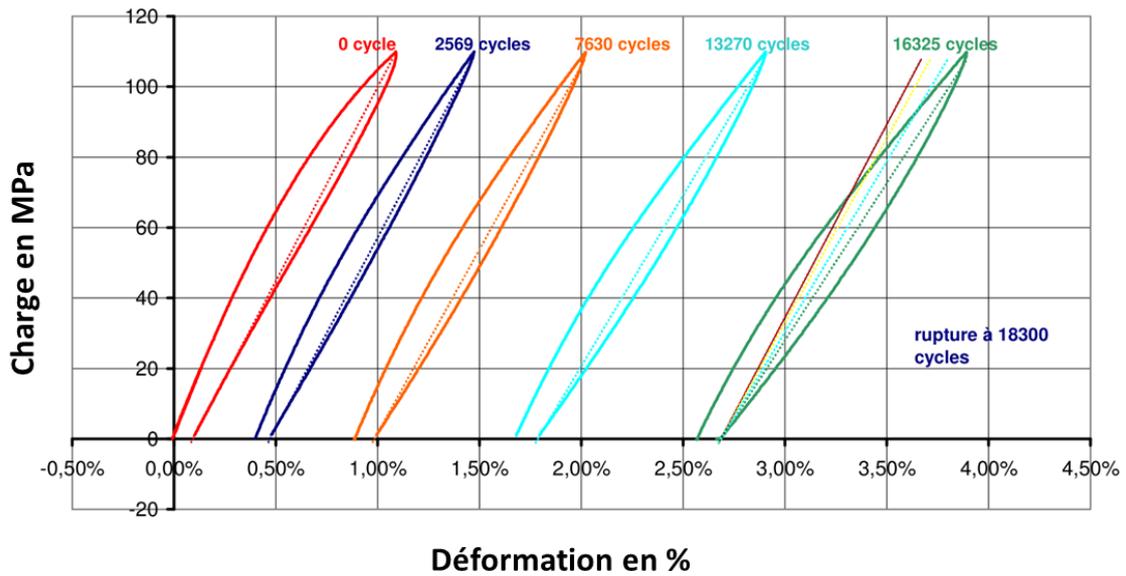


figure II-14 : Evolution de l'aire de l'hystérésis pour d'un composite stratifié  $[\pm 45]$  verre/époxy sous fatigue en traction-traction [200]

### II.4.2.3. Sélection des paramètres pertinents

Pour identifier les paramètres d'endommagement, l'analyse est menée sur des sous-parties de l'enregistrement principal (toutes les 30 secondes) en partitionnant les données. Les paramètres étudiés sont :

- L'aire de l'hystérésis d'un point de vue global et local,
- Les déformations dans le sens longitudinal (xx),
- Les cartographies des déformations principales e1 et e2.

Les étapes importantes du traitement de données sont schématisées sur la figure II-15.

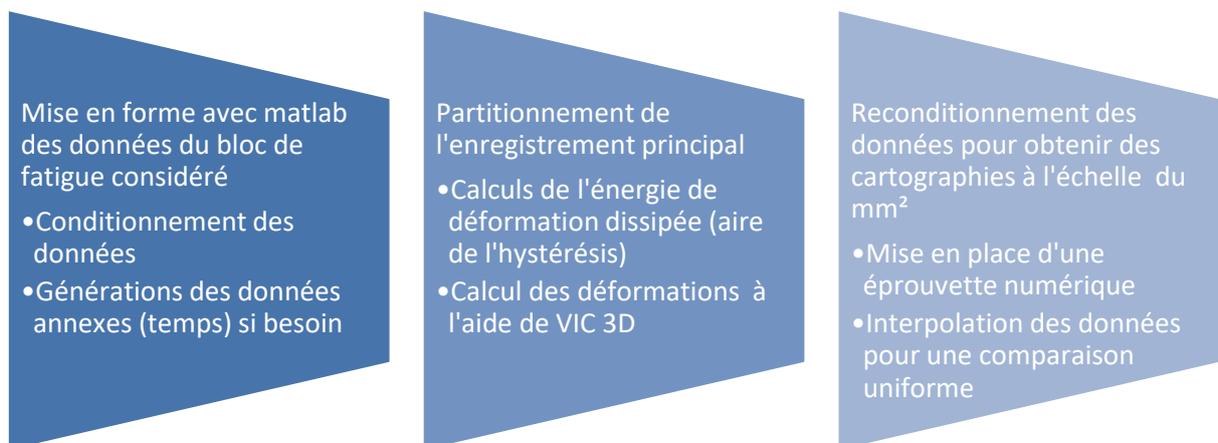


figure II-15 : Schéma du traitement des données en suivi continu en corrélation d'images numériques

### II.4.3. Acousto-ultrasons

Les acousto-ultrasons permettent une caractérisation de l'endommagement dans l'épaisseur du matériau dans un état hors contrainte. La méthode mise au point ici fournit également des cartographies de la dégradation pour la localisation des zones les plus endommagées basée sur une interpolation linéaire et une stratégie de fusion de données.

La méthode des acousto-ultrasons est un outil efficace pour l'évaluation de l'endommagement du fait de sa combinaison de la caractérisation ultrasonore et de la détection des émissions acoustiques [201]. Une onde acousto-ultrasonore peut être générée à l'aide de cassés de mines [114]. L'onde de Lamb générée par conversion de modes peut alors être reçue par un capteur piézoélectrique (figure II-16). Si plusieurs capteurs sont utilisés, il est possible de réaliser une fusion des données entre ces capteurs récepteurs pour améliorer le diagnostic de l'état d'endommagement du matériau.

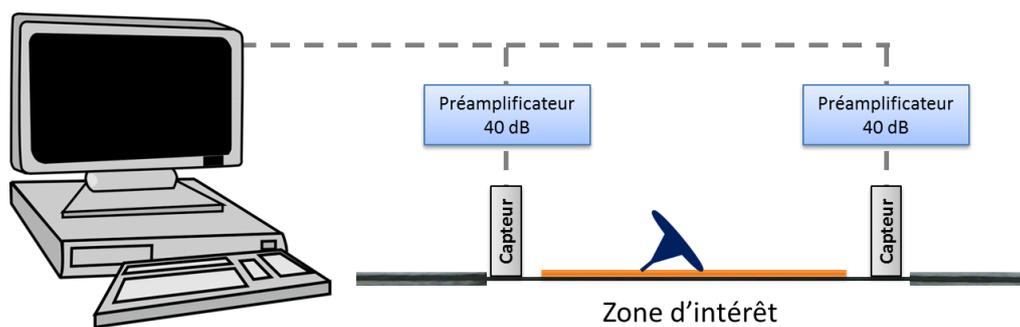


figure II-16 : Schéma de la chaîne d'acquisition des acousto-ultrasons

Le changement de position de la source artificielle sur différents nœuds d'un maillage permet de générer des cartographies 2D de paramètres pertinents (tels que l'amplitude ou la fréquence d'initiation des ondes). La variation de ces paramètres acoustiques sur le maillage d'étude permet de caractériser l'endommagement de l'échantillon. L'application de cette méthode à la suite de chaque chargement mécanique permet la mise en évidence de la propagation de la dégradation au sein du matériau. Les différentes étapes à mettre en œuvre sont décrites ci-après.

#### II.4.3.1. Maillage de la zone d'intérêt

La méthode des acousto-ultrasons peut être appliquée sur une structure entière ou seulement sur une partie de celle-ci. La première étape consiste à dessiner un maillage sur la

zone d'intérêt. Les dimensions des mailles et le nombre de capteurs de réception dépendent de la précision attendue. Si, par exemple, une grande surface est étudiée ( $1\text{m}^2$ ), l'utilisation d'un maillage de l'ordre de  $1\text{cm}^2$  augmentera les données et la précision des résultats, mais aussi le temps nécessaire à la réalisation des mesures. En fonction de l'atténuation du matériau, plusieurs capteurs de réception seront nécessaires pour s'assurer que chaque nœud du maillage est effectivement détecté par au moins un capteur. Ces capteurs de réception peuvent être placés dans la zone étudiée (réduisant le nombre de points utilisés pour la caractérisation) ou à l'extérieur de celle-ci.

Sur les éprouvettes de fatigue, un maillage est dessiné sur la zone utile de  $120\times 20\text{mm}$ . Dans le sens longitudinal, 23 nœuds sont obtenus avec un pas de  $5.2\text{mm}$  et 4 nœuds dans le sens transversal (pas de  $4.5\text{mm}$ ), soit 92 nœuds au total (figure II-17). Cette résolution du maillage n'est pas suffisante pour évaluer finement l'état d'endommagement du matériau. Une interpolation numérique sera nécessaire pour améliorer la résolution du maillage.

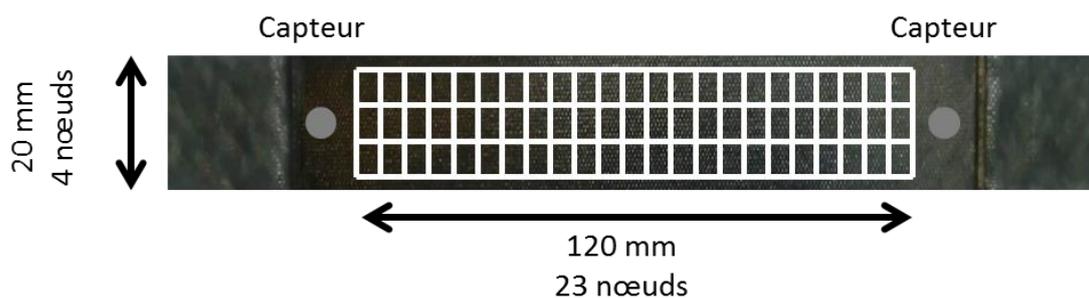


figure II-17 : Schéma du maillage de la zone d'étude

#### II.4.3.2. Génération de sources acoustiques artificielles

Les sources acoustiques artificielles sont générées à l'aide de cassés de mines de crayons selon la norme ASTM E76. Assurer la répétabilité des sources générées est une nécessité afin d'attester de la validité de la méthode. Les cassés de mines ont été effectués au moins trois fois à chaque nœud du maillage. Cette répétition à chaque maille permet l'estimation de paramètres moyens plus stables que les données brutes.

Pour vérifier la robustesse de la méthode, plusieurs paramètres acousto-ultrasonores sont relevés sur 10 nœuds parmi les 92 de l'échantillon en réalisant, sur chacun, cinq ruptures de mine de crayon. Le Tableau II-6 présente la valeur moyenne et l'écart-type pour chaque

paramètre. L'amplitude est la plus stable avec seulement 3dB d'écart type. Tous les autres paramètres acousto-ultrasonores présentent une reproductibilité similaire validant la robustesse des cassés de mines.

Tableau II-6 : Evaluation de la répétabilité des cassés de mines

Paramètre AU	Valeur moyenne pour 5 cassés de mines	Ecart-type	Ecart à la moyenne en %
Amplitude (dB)	86.5	3.0	3.5
Nombre de coups	8.7	1.3	14.9
Fréquence moyenne (kHz)	174	7.6	4.3
Fréquence d'initiation (kHz)	165	11.4	6.9
Fréquence de réverbération (kHz)	131.5	12.8	9.7
Fréquence au pic (kHz)	182	6.4	3.6

### II.4.3.3. Interpolation numérique des cartographies acousto-ultrasonores

Le maillage réalisé sur la zone d'intérêt du matériau n'est pas assez fin pour évaluer précisément l'endommagement du composite. Ce problème est résolu par interpolation linéaire des paramètres précédents sur un maillage numérique plus fin. Cette interpolation a permis l'obtention de cartographies à l'échelle millimétrique.

Pour valider les résultats de cette interpolation, des cassés de mines ont été réalisés à la surface du matériau. Un tiers des données est utilisé pour la génération de cartographies tandis que le reste est interpolé et comparé aux valeurs expérimentales. Le pas du maillage utilisé pour la validation de l'interpolation a été doublé comparé à celui d'origine. Ce processus de validation est illustré à la figure II-18.

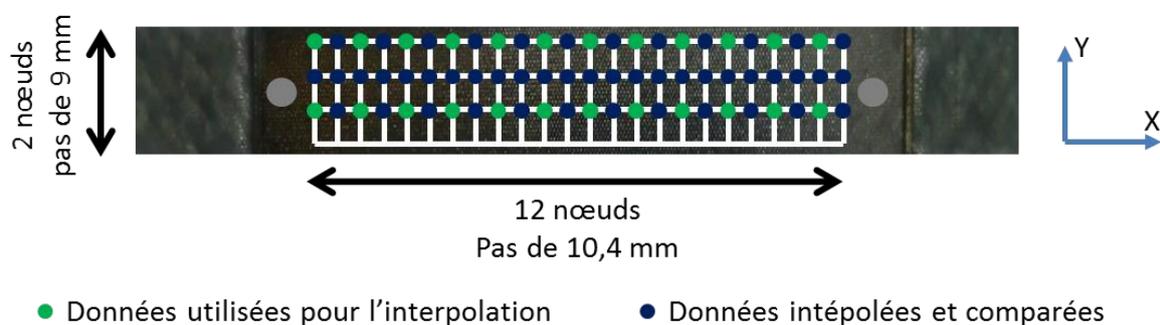


figure II-18 : Schéma des données utilisées pour la validation de l'interpolation

La différence moyenne entre les données interpolées et celles obtenues expérimentalement est présentée au Tableau II-7. Elle ne dépasse pas 2% d'erreur, prouvant la qualité de l'interpolation.

L'absence d'environ un tiers des données n'introduit pas d'erreur significative pour l'évaluation des paramètres acousto-ultrasonores. Ainsi, l'utilisation des 92 nœuds précédents couplés à la méthode d'interpolation linéaire permet l'obtention de cartographies précises de la dégradation du composite à l'échelle millimétrique.

**Tableau II-7 : Evaluation de la qualité de l'interpolation**

Paramètre AU	Différence entre les données expérimentales et interpolées en %
Amplitude (dB)	0.6
Nombre de coups	1.7
Fréquence moyenne (kHz)	0.8
Fréquence d'initiation (kHz)	0.6
Fréquence de réverbération (kHz)	0.9
Fréquence au pic (kHz)	2.0

#### **II.4.3.4. Fusion des cartographies de chaque capteur**

Chaque capteur fournit une cartographie de l'endommagement du matériau dans son voisinage. La combinaison de plusieurs cartographies, ici deux, permettra d'améliorer l'estimation de l'endommagement en multipliant le nombre de sources de données. Dans la présente étude, les données des deux capteurs ont été fusionnées à l'aide d'une règle de fusion basée sur l'amplitude maximale consistant à ne conserver que l'amplitude la plus importante à l'échelle du mm<sup>2</sup>. La figure II-19 illustre cette règle de fusion.

Dans le cas d'étude présenté, seuls deux capteurs ont été utilisés sur la zone utile de l'éprouvette en raison de sa petite taille. Pour des applications offrant plus d'espace, plusieurs capteurs peuvent être fixés sur le matériau, permettant d'améliorer davantage le résultat de fusion.

En somme, cette méthode permet l'obtention de cartographie d'endommagement du matériau hors sollicitation mécanique. Si les données enregistrées sont utilisées seules, cette technique requiert un grand nombre de mailles et augmente la durée de réalisation des

essais. L'utilisation de traitements de données complémentaires comme l'interpolation linéaire et la fusion de données résout ces problématiques.

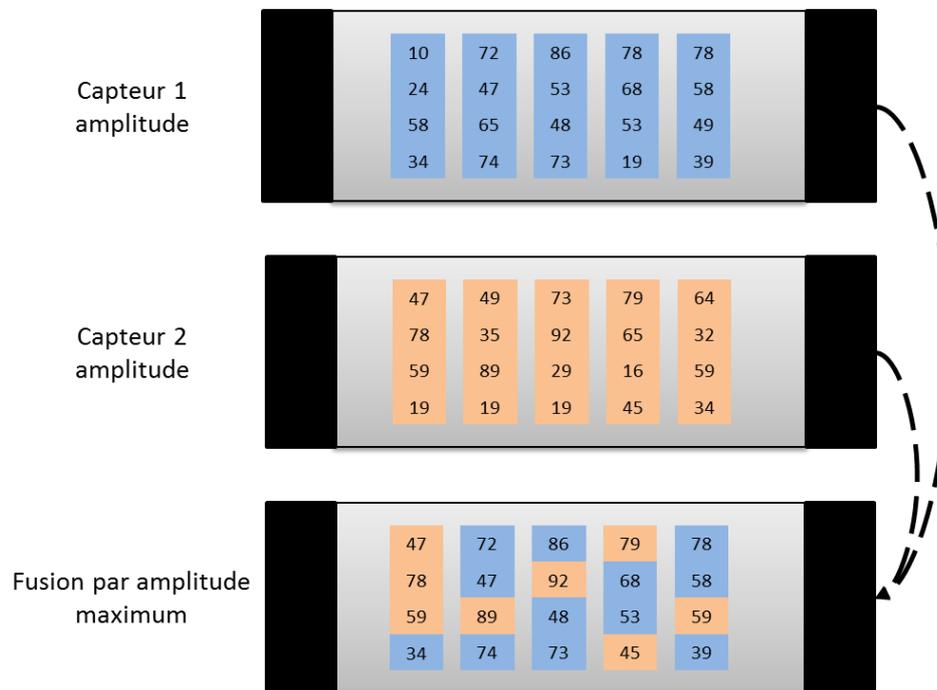


figure II-19 : Schéma de la fusion avec la règle de l'amplitude maximale

#### II.4.4. Emission acoustique

L'émission acoustique est utilisée afin de réaliser le suivi en temps réel de l'endommagement mécanique du matériau sous contrainte. Cependant, l'utilisation de deux capteurs apposés sur l'éprouvette ne permet qu'une localisation linéaire, donc biaisée, des événements acoustiques. Une nouvelle méthode basée sur des réseaux de neurones est donc développée afin de localiser les sources des émissions acoustiques en 2D, permettant d'obtenir des cartographies de l'endommagement du matériau.

##### II.4.4.1. Dispositif expérimental et définition des descripteurs acoustiques

Une centrale d'acquisition (8 voies à 16 bits, Euro Physical Acoustic) est utilisée pour enregistrer et post-traiter l'activité acoustique collectée par les deux capteurs fixés sur la surface du composite et connectés à des préamplificateurs à 40dB de gain. La distance entre les deux capteurs est de 120mm. Le couplage entre le capteur et le matériau est réalisé à l'aide d'une graisse silicone. Le seuil d'acquisition a été fixé à 35 dB, afin de s'affranchir du bruit de fond de la machine hydraulique de fatigue (figure II-20).

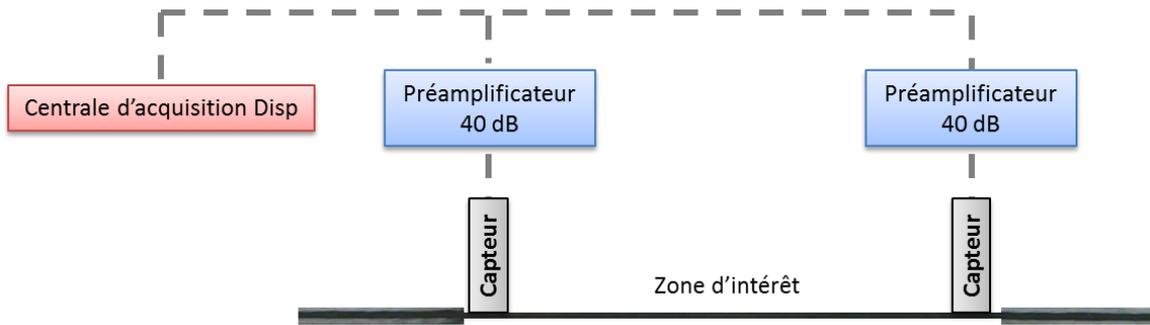


figure II-20 : Schéma de la chaîne d'acquisition de l'émission acoustique

Pour chaque salve acoustique dépassant le seuil d'acquisition, le système fournit 13 descripteurs temporels et fréquentiels. Les principaux sont visualisés sur la figure II-21 :

- Temps de montée : temps en microsecondes séparant le premier dépassement du seuil ( $t_0$ ) et l'instant où l'amplitude du signal est maximale ( $t_m$ ).
- Nombre de coups au pic : nombre de dépassements du seuil entre  $t_0$  et  $t_m$ .
- Nombre de coups : nombre de dépassements de la valeur seuil sur toute la durée de la salve.
- Amplitude : maximum en valeur absolue du signal enregistré.

$$A = 20 \log \left( \frac{V_{\max}}{1 \mu\text{volt}} \right) - (\text{gain préamplificateur}) \quad (\text{II.6})$$

- Durée : temps entre  $t_0$  et le temps du dernier dépassement du seuil, noté T.
- Energie : calculée à partir de l'amplitude du signal :

$$E(T) = \int_T A dt \quad (\text{II.7})$$

- Energie absolue : exprimée en attoJoule (aJ), sachant que  $1 \text{ aJ} = 10^{-18} \text{ J}$

$$E_{\text{abs}}(T) = \int_T |A|^2 dt \quad (\text{II.8})$$

- Fréquence moyenne : rapport du nombre de coups et de la durée du signal
- Fréquence de réverbération : exprimée en kHz et définie par

$$F_{\text{rev}} = \frac{\text{Nombre de coups} - \text{Nombre de coups au pic}}{\text{Durée} - \text{Temps de montée}} \quad (\text{II.9})$$

- Fréquence d'initiation : exprimée en kHz et définie par

$$F_{\text{init}} = \frac{\text{Nombre de coups au pic}}{\text{Temps de montée}} \quad (\text{II.10})$$

- RMS (Root mean square) : valeur efficace du signal reçu en volts.

- ASL (Average Signal Level) : moyenne de l'amplitude du signal en dB.
- Puissance du signal : intégrale de la tension redressée au cours de la salve.

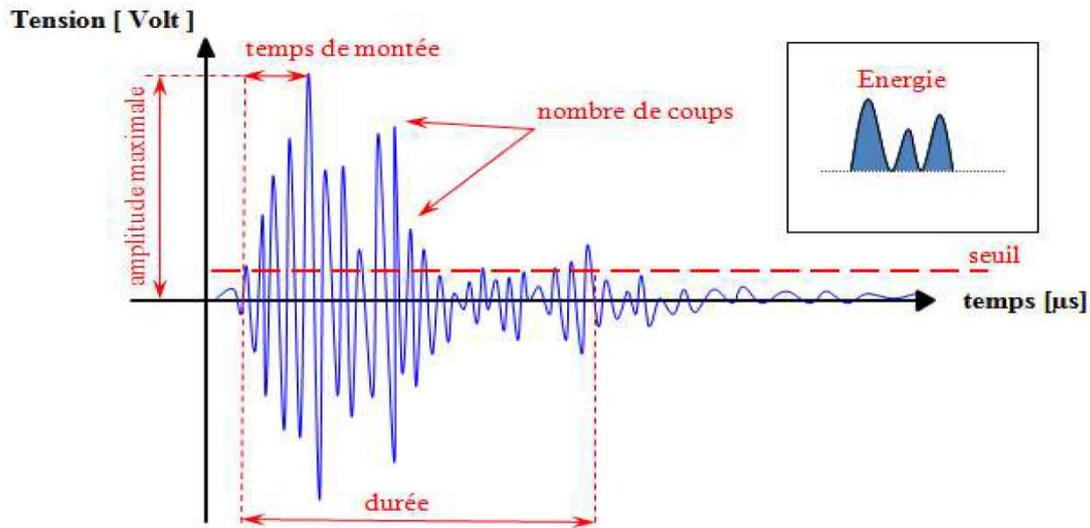


figure II-21 : Définition des principaux paramètres temporels d'émission acoustique acquis par le dispositif d'émission acoustique

#### II.4.4.2. Choix des capteurs

Deux capteurs piézoélectriques sont utilisés afin de détecter les émissions acoustiques générées lors de l'endommagement du matériau. Deux types de capteurs existent : les capteurs larges bandes et les capteurs résonnants. La sensibilité des capteurs résonnants permet la détection des signaux les plus faibles suivant le matériau considéré. Pour choisir les capteurs résonnants les plus sensibles à l'endommagement du matériau étudié, trois gammes de fréquences ont été évaluées dont les caractéristiques sont présentées au Tableau II-8.

Tableau II-8 : Caractéristiques des capteurs d'émission acoustique (Mistras Eurosonics)

Capteur	R15	Nano30	Micro80
Dimension (diamètre x hauteur) (mm)	19x22.4	8x8	10x12
Gamme de fréquence d'utilisation (kHz)	50-200	125-750	175-200
Fréquence de résonnance (kHz)	75 [150]	140 [300]	250 [325]
Température de fonctionnement (°C)	-65/175	-65/177	-65/177

La sensibilité de trois types de capteurs (R15, Nano30 et Micro80, Mistras Physical Acoustics) est caractérisée à l'aide d'un essai acoustique (AST : Automatic Sensor Test). Chaque capteur est validé successivement avec une impulsion électrique de type échelon à la fois comme

émetteur puis comme récepteur sur le matériau composite (AST entre deux capteurs) ou en mode écho (AST avec un capteur).

La chaîne d'acquisition utilisée est identique à celle présentée précédemment (§ 1.2.7). Le critère choisi pour l'évaluation de la sensibilité du capteur est l'amplitude. Les résultats sont présentés dans le Tableau II-9.

**Tableau II-9 : Résultats en amplitude (dB) des tests AST pour les différents capteurs d'émission acoustique**

R15		
	Capteur 1	Capteur 2
Capteur 1	98	78
Capteur 2	73	98
Nano30		
	Capteur 1	Capteur 2
Capteur 1	96	59
Capteur 2	55	98
Micro80		
	Capteur 1	Capteur 2
Capteur 1	98	80
Capteur 2	85	98

Au regard de ces résultats, il apparaît que le capteur nano 30 est le moins performant sur le matériau étudié (amplitude détectée plus faible entre les deux capteurs). Les capteurs R15 et micro 80 sont équivalents en mode écho mais les micro 80 présentent un avantage en mode émission-réception pour les interactions à distance. Ainsi, les capteurs micro 80 sont choisis pour la suite de l'étude.

#### **II.4.4.3. Paramètres d'acquisition des salves**

La gestion de l'enregistrement des émissions acoustiques nécessite d'évaluer une durée moyenne des salves afin de ne pas en enregistrer plusieurs simultanément. Pour cela, il est nécessaire de définir trois fenêtres temporelles : PDT (Peak Definition Time), HDT (Hit Definition Time) et HLT (Hit Lockout Time). La première correspond au temps entre le dépassement du seuil et le pic, la seconde à la durée pendant laquelle aucun dépassement du seuil n'est détecté et la dernière, au temps d'aveuglement du système (voir figure II-22).

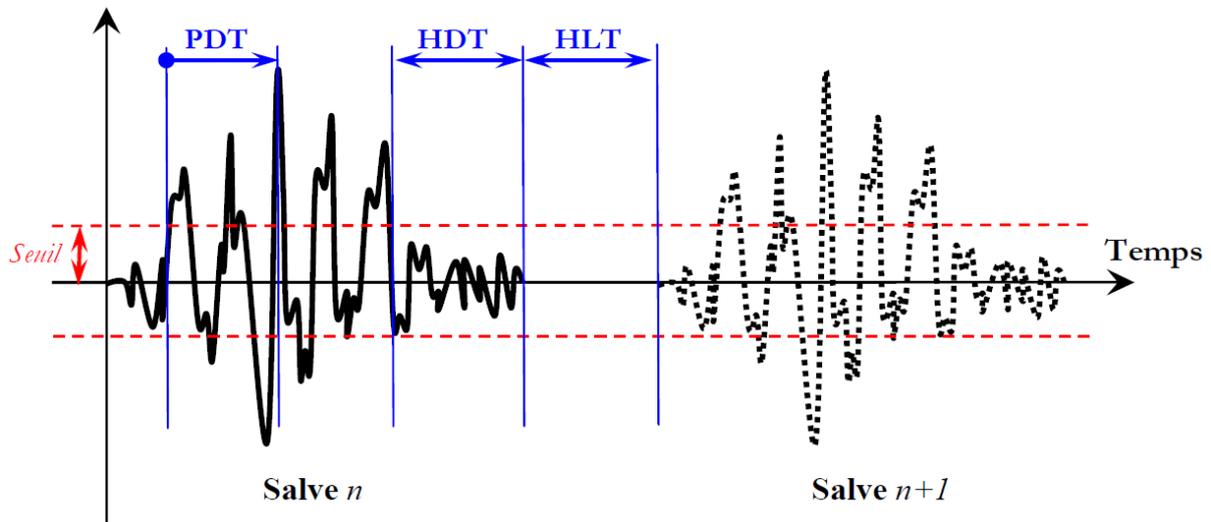


figure II-22 : Définition des différentes fenêtres temporelles associées à une salve d'émission acoustique [173]

Les valeurs des fenêtres d'acquisition (PDT, HDT, HLT) sont obtenues à partir de différents cassés de mines et d'observations des émissions acoustiques reçues. Le guide du logiciel (AEwin, Mistras Physical Acoustics) propose des valeurs de référence pour les matériaux composites. Ces valeurs sont assez proches de celles déterminées expérimentalement (Tableau II-10).

Tableau II-10 : Fenêtres temporelles d'émissions acoustique pour l'acquisition

Fenêtre temporelle	Valeurs proposées dans le guide du logiciel AEwin	Valeurs mesurée expérimentalement et retenue dans la suite
PDT ( $\mu\text{s}$ )	50	75
HDT ( $\mu\text{s}$ )	100	110
HLT ( $\mu\text{s}$ )	300	300

#### II.4.4.4. Protocole de localisation des sources acoustiques

La localisation des événements acoustiques par triangulation est l'un des intérêts de la méthode d'émission acoustique. Cependant, l'obtention d'une cartographie 2D des événements requiert la fixation d'au moins trois capteurs sur la pièce étudiée, ce qui n'est pas envisageable dans le cas présent compte-tenu des dimensions des éprouvettes. L'utilisation de deux capteurs permet seulement une localisation linéaire sur la droite passant par leurs centres. Cette localisation ne correspond pas à la réalité et introduit des erreurs. Par conséquent, une nouvelle méthode est développée pour obtenir des

cartographies 2D des évènements acoustiques à l'aide de seulement deux capteurs. Cette méthode est basée sur l'analyse Delta-T [113] et une analyse par réseaux de neurones.

L'utilisation des réseaux neuronaux nécessite une grande quantité de données afin de les entraîner pour réaliser la localisation. Cependant, les données enregistrées durant l'essai de fatigue ne peuvent être utilisées puisque la position des sources est inconnue. Pour réaliser la phase d'apprentissage, les données des acousto-ultrasons précédemment générées ont été utilisées. Étant donnée la variabilité des émissions acoustiques d'un chargement mécanique à l'autre [110], l'obtention d'une cartographie fiable et précise est conditionnée à la mise en place de réseaux de neurones à chaque bloc de fatigue. La gestion et la formation des réseaux est une étape complexe détaillée avec la méthodologie ci-après :

1. **Formation des réseaux de neurones:** 90% des données reçues du maillage de la zone d'étude (signaux des cassés de mines) sont utilisées pour former un réseau neuronal artificiel. Deux réseaux de neurones sont entraînés. Le premier détermine l'origine de l'évènement acoustique dans le sens de la longueur (X) et le second dans la direction transversale (Y) (figure II-18). Les entrées de ces réseaux incluent tous les paramètres acoustiques enregistrés pour chaque capteur ainsi que la différence des temps d'arrivée des évènements acoustiques aux deux capteurs. Les réseaux ont donc 14 entrées, une couche cachée composée de 22 neurones obtenue après plusieurs simulations [19, 20] et une sortie (X ou Y). Ces deux réseaux ont la même structure de sortie (figure II-23). En raison du non-déterminisme de l'apprentissage des réseaux, la littérature conseille de générer plusieurs réseaux et de ne conserver que les plus précis. Ainsi, pour chaque configuration et bloc de fatigue une centaine de réseaux a été générée.
2. **Vérification de la précision des réseaux de neurones:** une fois la phase d'entraînement terminée, les 10% de données restants sont utilisés pour vérifier la précision des résultats en termes d'erreurs moyennes et d'écart-type. Les erreurs obtenues sont de l'ordre de  $\pm 3\%$  (soit 5mm) dans le sens longitudinal avec les deux capteurs et de  $\pm 7\%$  (soit 1.5mm) dans le sens transversal.
3. **Application des réseaux de neurones aux données des essais mécaniques :** la dernière étape est la validation de cette méthode. Le matériau, sur lequel les cassés

de mines ont été préalablement réalisés, est sollicité en fatigue et les événements acoustiques sont enregistrés et utilisés avec les réseaux neuronaux précédents pour la localisation. Les incertitudes de localisation sont prises en compte pour la détermination de la zone d'initiation de l'onde acoustique considérée.

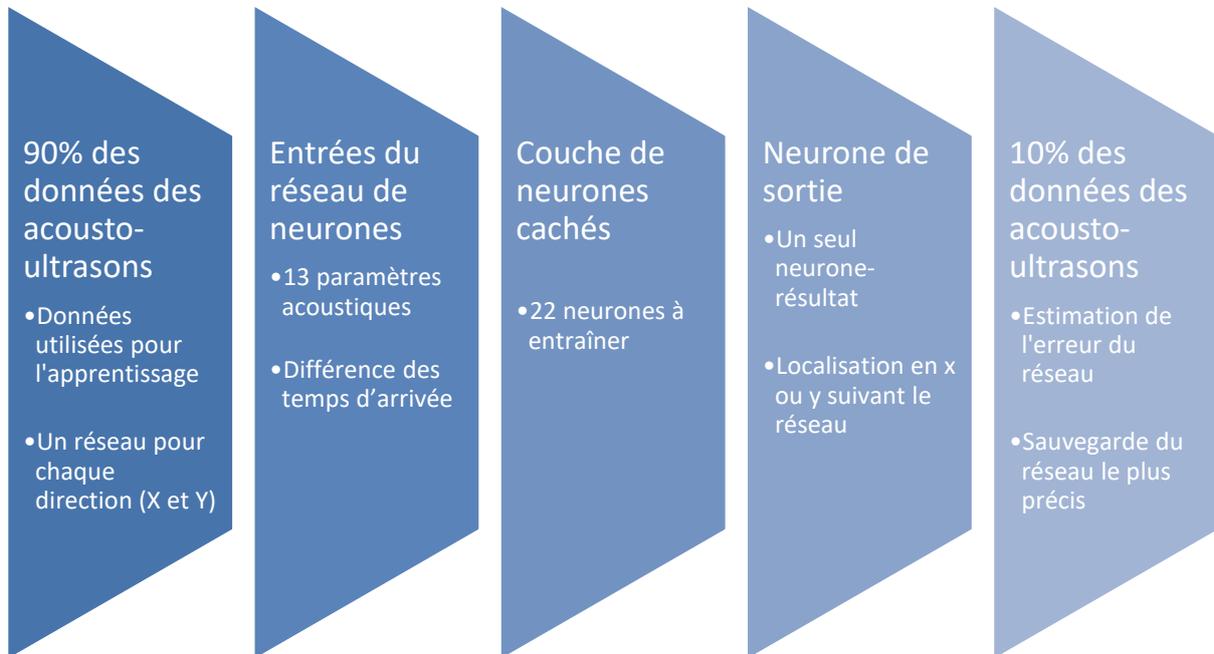


figure II-23 : Entraînement des réseaux de neurones pour la localisation des ondes acoustiques

Les différentes étapes de la méthode permettent de générer des réseaux de neurones dont les erreurs ont été estimées. La précision obtenue avec les réseaux de neurones est également vérifiée durant la vie du matériau pour trois cas de chargement mécanique : 30%, 50% et 70% UTS. Les résultats des écarts moyens entre les valeurs réelles et celles obtenues à l'aide de la localisation par réseau de neurones pour ces différents niveaux de chargement mécanique sont présentés au Tableau II-11.

Tableau II-11 : Evaluation des écarts moyens pour les localisations en X et en Y par réseau de neurones

	30% UTS	50% UTS	70% UTS
écart en x (%)	4.2	3.7	2.2
écart en y (%)	6.5	5.7	10.3

Les différences d'un niveau de chargement à un autre peuvent s'expliquer par le non-déterminisme de l'apprentissage des réseaux de neurones. La précision des réseaux dépendant également des données d'entraînement, il est logique d'observer une erreur plus

importante pour la localisation transversale (4 nœuds pour l'entraînement) que dans le sens longitudinal (23 nœuds pour l'entraînement).

Après estimation de l'erreur du réseau et vérification de l'intérêt de cette méthode avec la propagation de l'endommagement mécanique, ces réseaux de neurones artificiels sont appliqués sur les données enregistrées en fatigue comme présenté à la figure II-24.

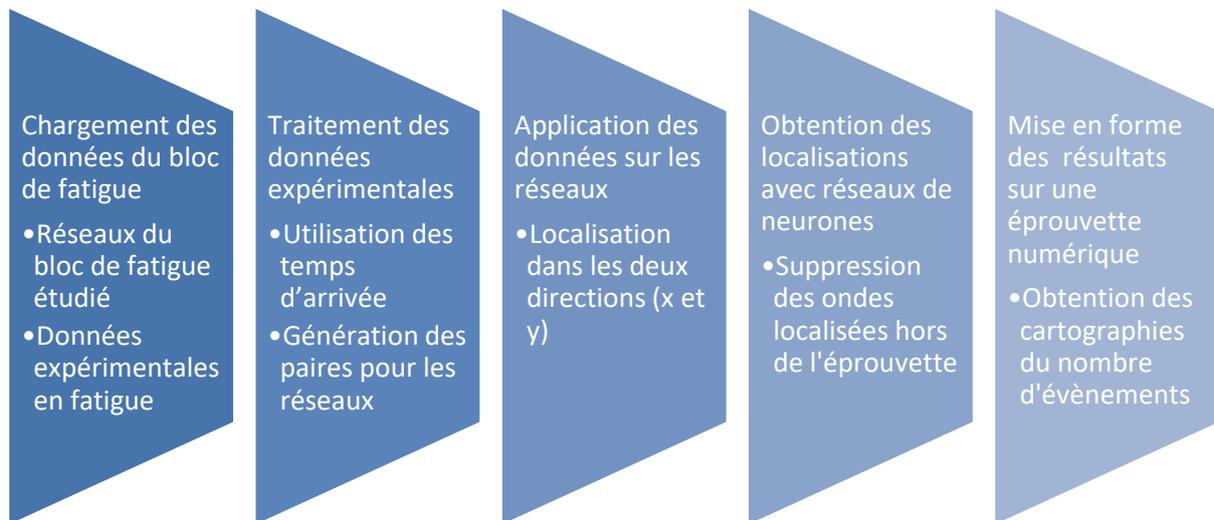


figure II-24 : Application des réseaux de neurones artificiels sur les données de fatigue

#### II.4.5. Caractérisation ultrasonore dans l'épaisseur

Les essais C-scan sont réalisés en immersion afin de caractériser l'endommagement dans l'épaisseur du composite. Cette caractérisation est menée hors contrainte. Contrairement aux ondes de Lamb, les résultats sont obtenus sous forme d'images pouvant être fusionnées avec les autres techniques non destructives.

La technique C-scan permet de déterminer, à partir de cartographies de temps de vol et d'amplitude, l'endommagement du matériau. Les transducteurs utilisés sont identiques (plans, de fréquence 5MHz, fournis par Olympus). Les signaux ont été échantillonnés à 100MHz et les déplacements de la sonde selon X et Y ont été incrémentés par un pas de 1mm. La température de l'eau est restée constante sur toute la durée des essais réalisés à 20°C (salle climatisée).

Les capteurs sont positionnés de part et d'autre perpendiculairement à l'éprouvette (figure II-25). Les temps de vol des ondes ultrasonores longitudinales sont mesurés dans l'épaisseur

du matériau sur l'ensemble de la surface de l'éprouvette. Cette mesure permet l'obtention de la vitesse de propagation pixel par pixel.

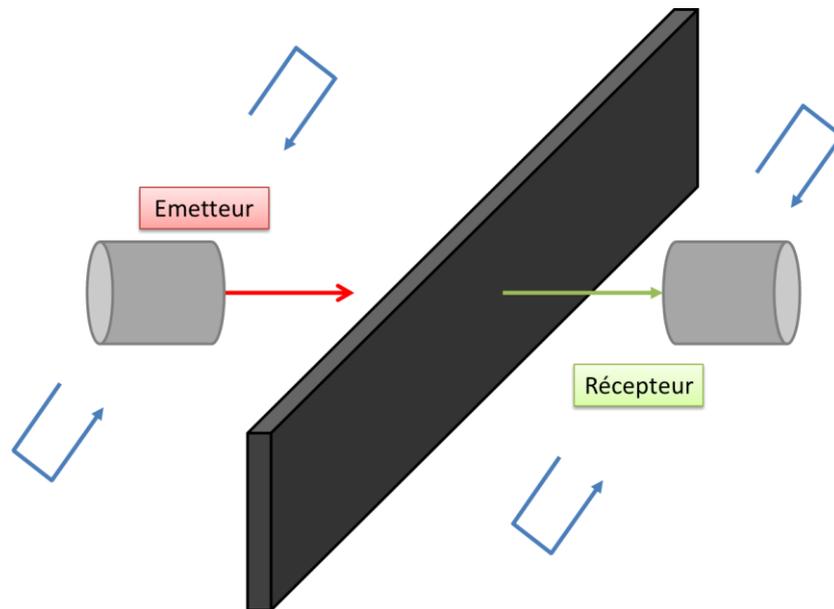


figure II-25 :Détermination de la vitesse V33 en mode transmission

L'évaluation de l'endommagement est réalisée à l'aide de deux paramètres : la vitesse du matériau dans le sens de l'épaisseur et l'amplitude temporelle de l'onde reçue.

La vitesse dans l'épaisseur est obtenue après estimation du temps de vol et prise en compte de l'épaisseur du matériau.

#### II.4.6. Ondes de Lamb sous chargement mécanique statique

Les deux capteurs (Micro80) utilisés pour l'émission acoustique sont employés pour générer et enregistrer des ondes de Lamb suivant l'axe longitudinal de l'éprouvette soumise à un effort statique de traction. Le capteur placé en haut de l'éprouvette est excité par un train d'onde (5 cycles) à une fréquence de 310 kHz en utilisant une carte de génération de signaux (ARB 1440-35, EPA Mistras) intégrée dans un ordinateur. Le second capteur placé à 120mm du premier reçoit et enregistre l'onde de Lamb composée de plusieurs modes. La fréquence de 310kHz a été choisie afin de mettre en évidence le mode symétrique  $S_0$  permettant de quantifier l'endommagement dans cette direction en fonction du bloc de fatigue appliqué (figure II-26).

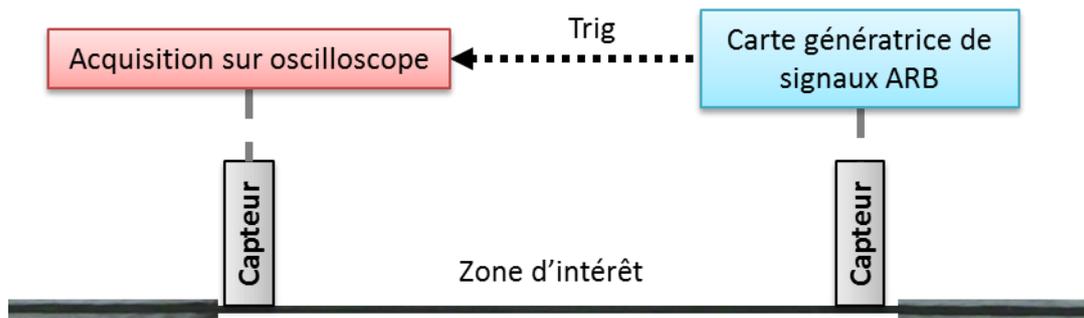


figure II-26 : Chaîne d'acquisition des ondes de Lamb

Lors de chaque mesure, les ondes sont enregistrées. L'amplitude temporelle est utilisée afin d'évaluer l'augmentation de l'atténuation du matériau induite par la dégradation mécanique.

Les mesures sont effectuées sous contraintes avant et après chaque bloc de fatigue. La contrainte mécanique appliquée est alors la valeur moyenne de chaque chargement mécanique sur la machine de fatigue.

L'étude de l'endommagement est réalisée en comparant les paramètres d'endommagement entre deux états du matériau : antérieur et postérieur à chaque bloc de chargement. Les quantités obtenues sont donc des variations relatives d'un état d'endommagement « i » à un autre « i+1 ». Cette présentation relative est nécessaire pour pallier la non-répétabilité parfaite des conditions expérimentales d'un essai à un autre.

Contrairement aux techniques précédentes, les ondes de Lamb dans le sens de la longueur permettent seulement une évaluation globale de l'endommagement. En effet, l'onde de Lamb interroge le matériau sur la totalité de son trajet, soit la distance entre l'émetteur et le récepteur. De plus, elle ne permet pas l'obtention d'images comparables avec les contrôles non destructifs précédents.

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, ont été détaillées les conditions expérimentales de mise en œuvre des essais de fatigue multi-instrumentés avec six techniques différentes d'évaluation de l'endommagement du composite. Le challenge était ici de mettre en place plusieurs techniques de caractérisation non destructive simultanément dans les meilleures conditions

d'acquisitions. A cette fin, une enceinte d'isolation a été conçue et réalisée afin de protéger la zone d'étude des perturbations lumineuses (pour la corrélation d'images numériques) et thermiques (pour la thermographie infrarouge).

Les méthodologies appliquées sur les différentes techniques de contrôle non destructif mises en œuvre permettent d'assurer l'obtention de résultats originaux pour la caractérisation de l'endommagement.

La thermographie infrarouge passive permet d'introduire une nouvelle modélisation plus complète que celles actuellement disponibles dans la littérature prenant en compte les domaines thermiques transitoires et permanents ainsi que les effets thermoélastiques.

L'analyse des données de la corrélation d'images numériques permettra de caractériser l'endommagement du matériau via la localisation des zones de concentration des contraintes et l'évaluation des aires d'hystérésis (contrainte-déformation).

L'utilisation des acousto-ultrasons pour identifier les zones les plus endommagées du matériau constitue une approche novatrice. L'intérêt majeur de cette technique est son application hors contrainte et la possibilité de généralisation à des structures plus larges et complexes.

L'émission acoustique, couplée à une analyse par réseaux de neurones artificiels, a permis de mettre au point une méthodologie de localisation en 2D avec seulement deux capteurs. Cette méthode inédite permet alors la caractérisation de l'endommagement en complément des capacités de détection classiques de cette technique.

La méthode des ondes de Lamb est la seule appliquée sous contrainte statique ; elle permet d'évaluer l'endommagement du matériau dans son intégralité, mais sa localisation n'est pas réalisable.

Le chapitre suivant présentera les résultats expérimentaux obtenus pour chaque technique ainsi que l'évaluation de la dégradation mécanique du composite.

### **III. Evaluation de l'endommagement par techniques de contrôle non destructif**

Le chapitre III est consacré aux résultats expérimentaux obtenus au moyen de chacune des techniques de contrôle non destructif mises en œuvre : thermographie infrarouge passive, corrélation d'images numériques, acousto-ultrasons, émission acoustique et caractérisations ultrasonores par analyse C-scan et ondes de Lamb.

Afin d'éviter de multiplier la présentation de trop nombreuses cartographies, seuls les résultats de fin de chargement mécanique sont présentés pour les techniques permettant le suivi continu. Dans le cas de techniques réalisant le suivi ponctuel de l'état d'endommagement, les résultats sont présentés pour chaque bloc de fatigue réalisé.

### III.1. Thermographie infrarouge passive

La fonction de régression des données thermiques a été définie au chapitre II. Elle permet de prendre en compte les effets thermiques dans les domaines transitoires et permanents ainsi que les effets-thermoélastiques induits lors de la sollicitation en fatigue. Elle donne accès à des indicateurs d'endommagement du composite pouvant être utilisés lors de la fusion de données. Pour rappel, la fonction de régression utilisée est définie par :

$$T(t) = T_{stab} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + T_1 \sin(2\pi f t + \varphi_1) + T_2 \sin(2\pi 2f t + \varphi_2) \quad (\text{III.1})$$

avec :

- $T_{stab}$  la température de stabilisation,
- $\tau$  la constante de temps du matériau,
- $f$  la fréquence de sollicitation mécanique fixée à 4 Hz,
- $T_1, T_2$  les amplitudes thermiques du mode fondamental et du premier harmonique,
- $\varphi_1, \varphi_2$  les phases du mode fondamental et du premier harmonique.

#### III.1.1. Températures de stabilisation

Parmi les paramètres thermiques analysés, la température de stabilisation est l'indicateur le plus couramment utilisé pour l'évaluation de l'état d'endommagement des composites. En présentant l'évolution des températures stabilisées en fonction des niveaux de chargements mécaniques appliqués (essai d'auto-échauffement), les seuils d'endommagements du matériau sont identifiés (figure III-1).

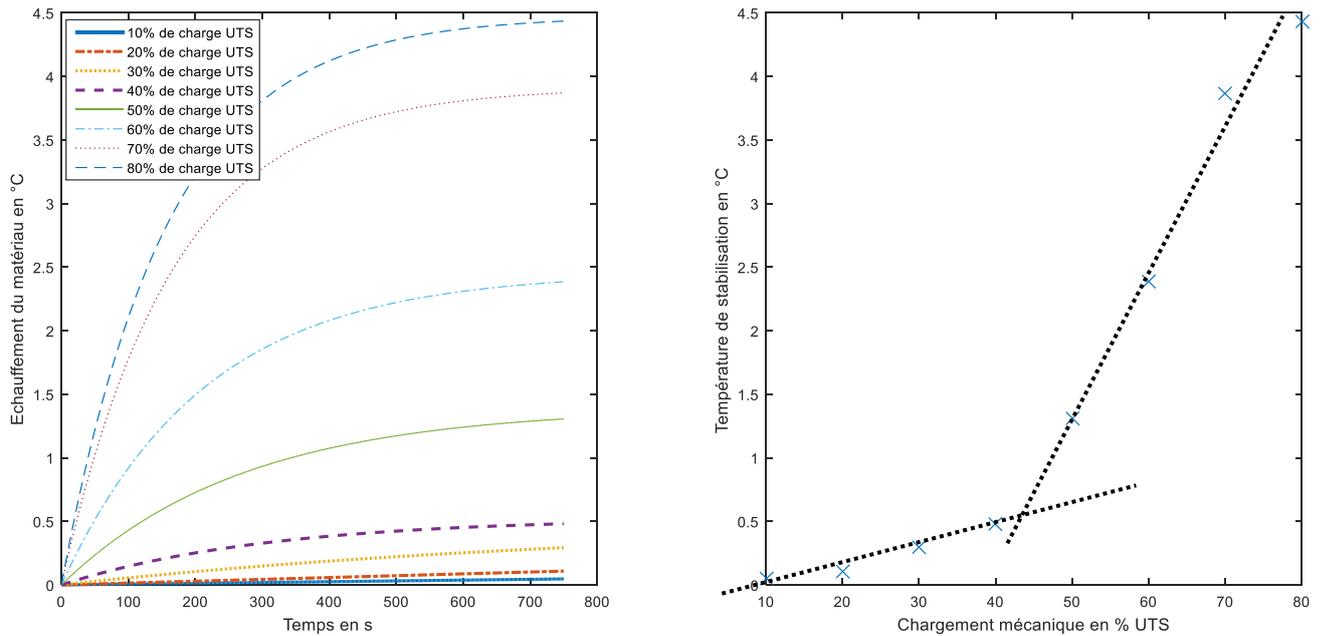


figure III-1 : Evolution de l'échauffement du composite en fonction du nombre de cycles pour différents niveaux de chargement mécanique et températures de stabilisation associées

Le comportement global de l'éprouvette présente une corrélation entre l'augmentation de la température de stabilisation et le chargement mécanique appliqué (i.e. le développement de l'endommagement). Lors de l'application des quatre premiers blocs de fatigue, le comportement du composite est similaire. L'élévation de la température moyenne liée à l'endommagement est faible ( $<1^{\circ}\text{C}$ ). Au-delà du chargement à 40% de la contrainte à rupture, le matériau présente un comportement dissipatif qui ne cesse de croître jusqu'à la rupture. Ce changement de comportement est utilisé afin de définir la limite d'endurance des composites par analogie avec les métaux. Dans le cas du composite considéré, cette méthodologie permet d'identifier le chargement à 47% de la rupture comme un seuil d'endommagement important du matériau. Ce résultat est en décalage par rapport à la limite d'endurance déterminée par la courbe de Wöhler (60% UTS). Aussi le terme de « seuil d'endommagement critique » est préféré dans cette étude. Toutefois, la température de stabilisation ne permet pas, à elle seule, la localisation de l'endommagement du matériau, les cartographies associées étant uniformes.

La constante de temps est le second paramètre de la régression de thermographie permettant une caractérisation globale de l'endommagement. Cependant, les valeurs de cet indicateur sont nettement plus dispersées (de  $10^3$  à  $10^8$  secondes) et moins stables au sein

d'une cartographie. De plus, les résultats associés à la constante de temps sont antagonistes à la température de stabilisation et n'apportent pas d'informations supplémentaires. Ce second paramètre ne sera donc pas exploité ici.

### **III.1.2. Mode fondamental de la régression**

#### **III.1.2.1. Amplitude thermique du mode fondamental**

L'identification des zones les plus endommagées est réalisée à l'aide de l'amplitude thermique du mode fondamental lors de la sollicitation mécanique. Cette analyse permet d'évaluer le comportement thermique et mécanique de chaque mm<sup>2</sup> du composite dans les différents cas de chargement (figure III-2).

Les cartographies associées à l'amplitude du premier sinus de la régression durant la sollicitation en fatigue permettent la localisation des zones endommagées. Il est possible d'identifier plusieurs comportements du matériau.

Lors des quatre premiers blocs de fatigue, les cartographies présentent une évolution homogène et globale de l'amplitude du mode fondamental. Lors de ces chargements, les effets de l'empilement sont particulièrement visibles avec les stries à 45° (sens de sollicitation identique à l'orientation des fibres à 0°). Les chargements à 30% et 40% de charge à rupture font apparaître également des événements thermiques orientés perpendiculairement à la sollicitation de fatigue pouvant être associés à la dégradation de l'avant dernier pli de l'empilement à 90°.

La cartographie de l'amplitude thermique à 50% UTS est la plus atypique. La distribution de l'amplitude thermique est alors identique à celle obtenue pour les chargements à 20% et 30% de charge à rupture. Cette évolution non-monotone du paramètre peut induire une erreur sur l'évaluation de l'endommagement du matériau.

La cartographie à 60% UTS présente les valeurs les plus importantes de l'amplitude thermique (environ 0.1°C) sur des zones localisées au centre de l'éprouvette. Ce maximum de dissipation coïncide également avec la limite d'endurance (60% UTS) évaluée à l'aide de la courbe de Wöhler. Ce chargement est aussi le premier à mettre en évidence des

hétérogénéités au sein du matériau. Ce seuil d'endommagement marque la dégradation de l'éprouvette au niveau local et non plus global.

Lors des blocs de fatigue à 70% et 80% UTS, seules quelques zones résiduelles du matériau présentent une amplitude thermique significative. Ce changement de comportement du composite peut être expliqué par l'amorçage de quelques fissures sur les bords de la zone d'étude. Ceci introduit une surface d'échange convectif supplémentaire comparativement aux blocs de fatigue précédents modifiant le comportement thermique du matériau.

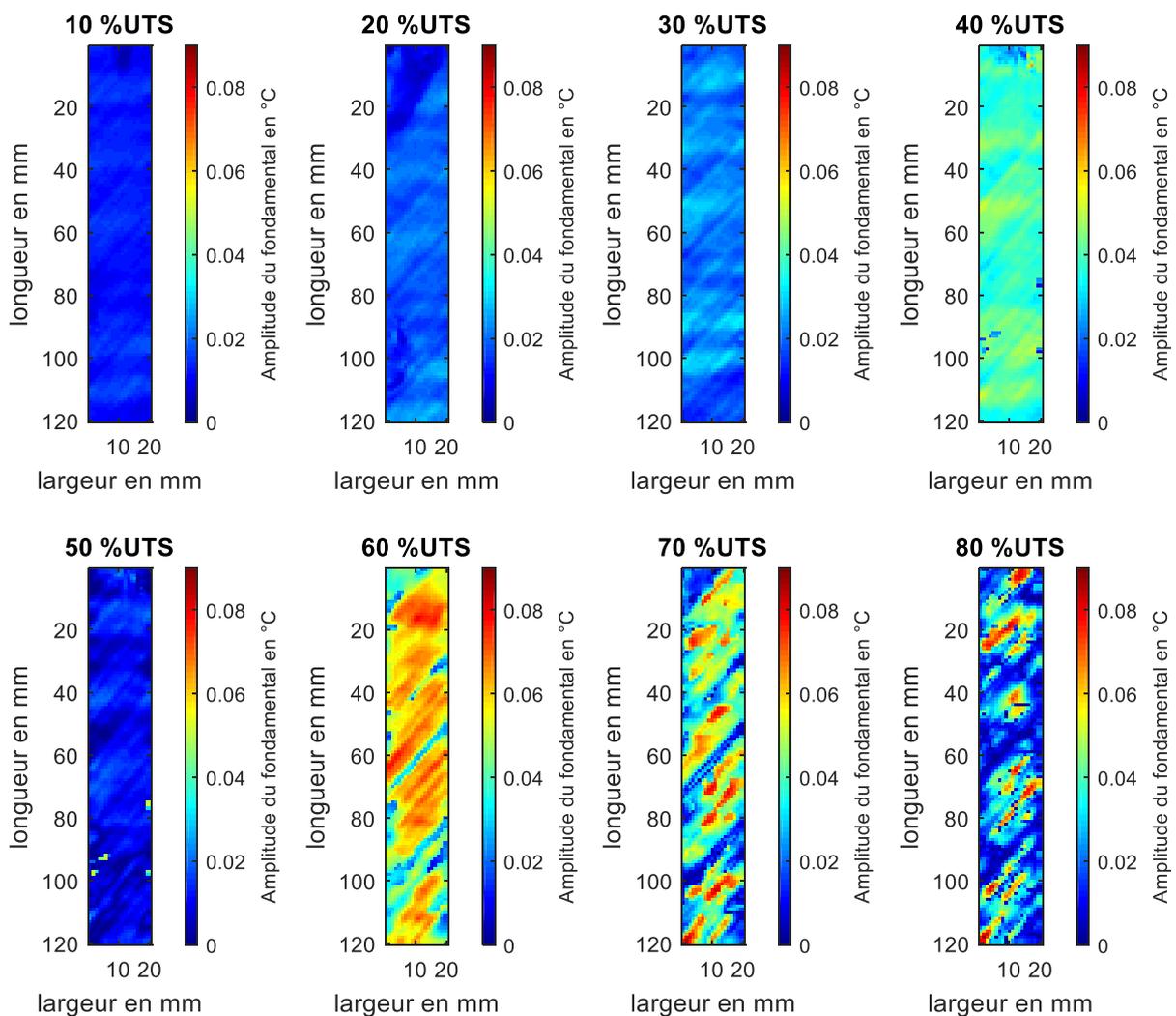


figure III-2 : Cartographies de l'amplitude thermique du mode fondamental en °C

Ce paramètre d'amplitude thermique ne peut être utilisé comme seul indicateur d'endommagement, car il n'évolue pas de manière monotone. Il est nécessaire de l'associer avec un autre indicateur comme la température de stabilisation afin d'évaluer efficacement l'état d'endommagement du matériau.

### III.1.2.2. Phase du mode fondamental

La phase du mode fondamental est également exploitée comme paramètre d'endommagement (figure III-3). Ce paramètre présente une sensibilité à l'endommagement différente des précédents. En effet, la phase est quasi-nulle dans le cas des premiers niveaux de chargement mécanique (de 10% à 30% de charge à rupture). Une première variation significative de la phase est visible à 40% UTS corrélée avec l'apparition du seuil d'endommagement critique. Les zones mises en évidence sont alors différentes de celles identifiées avec l'amplitude thermique de ce sinus. Elles correspondent aux zones générant des fissures à la surface du matériau. Cependant, elles ne sont visibles à l'œil nu qu'à partir de la sollicitation à 70% de charge à rupture.

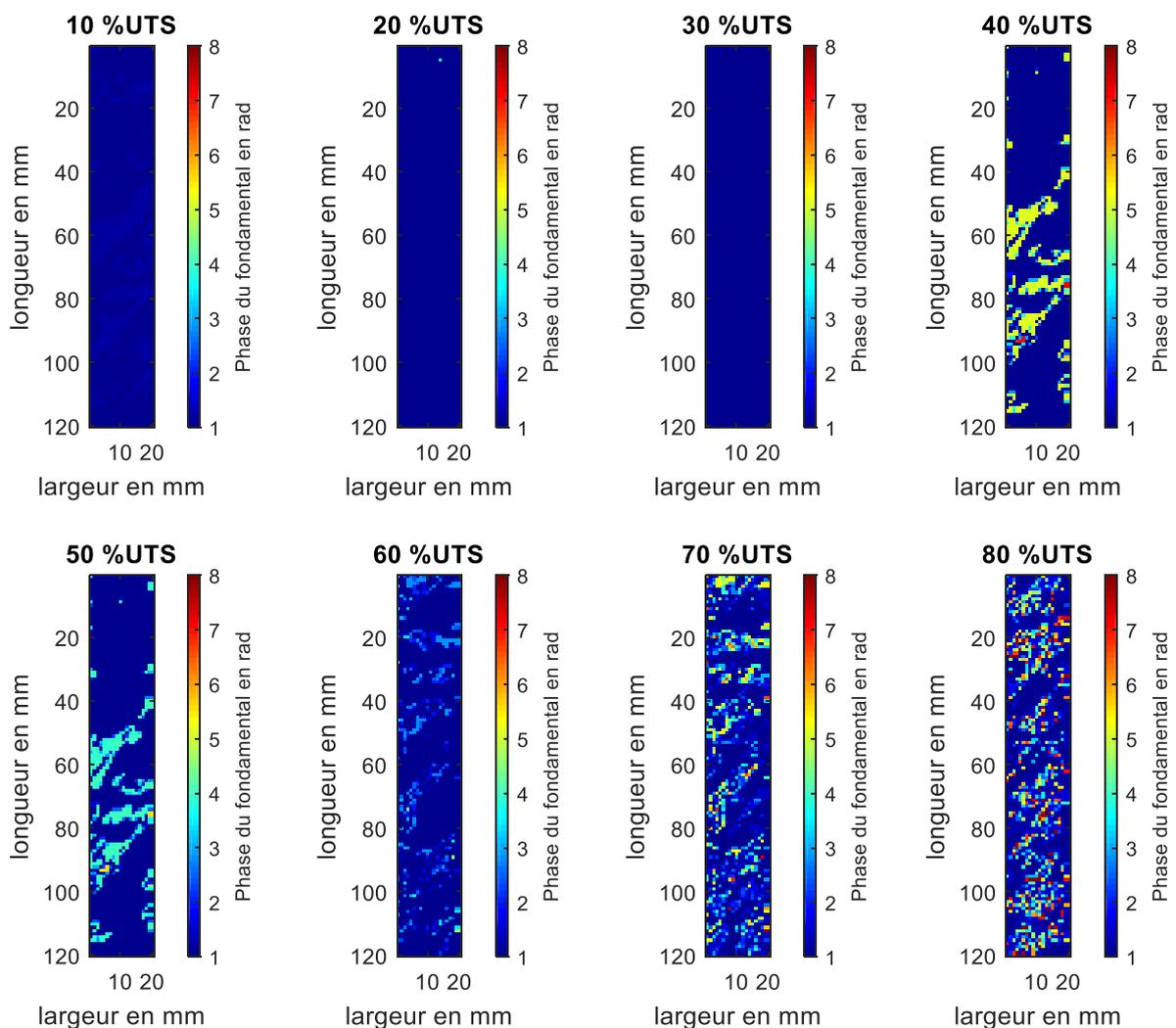


figure III-3 : Cartographies de la phase du mode fondamental en radians

Le chargement à 50% UTS conduit à l'identification des mêmes zones avec une phase plus faible que dans le cas précédent. La phase du mode fondamental est donc un paramètre stable permettant une identification efficace des zones endommagées à l'aide d'un fort contraste sur les cartographies du matériau.

Lorsque l'endommagement mécanique augmente, la localisation des zones endommagées est moins précise, l'endommagement se propageant à l'ensemble du composite. Ainsi, des disparités apparaissent sur l'ensemble de la zone d'étude lors du chargement à 60% UTS.

Les trois derniers chargements de fatigue (de 60% à 80% UTS) indiquent un changement de comportement du matériau avec le développement de l'endommagement. Les valeurs de phases font apparaître un minimum lors du bloc de fatigue à 60% de charge à rupture. Cet extremum induit un changement dans la localisation de l'endommagement. Avant ce chargement, les zones endommagées sont nettement identifiables par rapport aux zones « saines » de la surface du matériau. Après ce chargement, les capacités de localisation précises à l'aide de ce paramètre se trouvent réduites.

### **III.1.3. Amplitude de la première harmonique**

Les paramètres précédents permettent une évaluation de l'endommagement global du matériau ainsi que la localisation des zones les plus endommagées. Les indicateurs du second sinus (première harmonique à une fréquence de 8Hz) permettent l'évaluation d'évènements thermiques moins visibles lors d'une première analyse des résultats (de l'ordre de  $10^{-3}$ °C contre 0.1°C précédemment). L'évaluation de l'endommagement peut alors être complétée avec les résultats d'amplitude thermique de la première harmonique (figure III-4).

Ce paramètre est le seul à mettre en évidence un comportement dissipatif potentiel dès 30% UTS (40% UTS pour les trois indicateurs précédents). Ceci est identifiable avec l'apparition d'hétérogénéités dès le troisième chargement mécanique. L'endommagement détecté par ce paramètre présente donc un caractère complémentaire comparativement à ceux présentés précédemment.

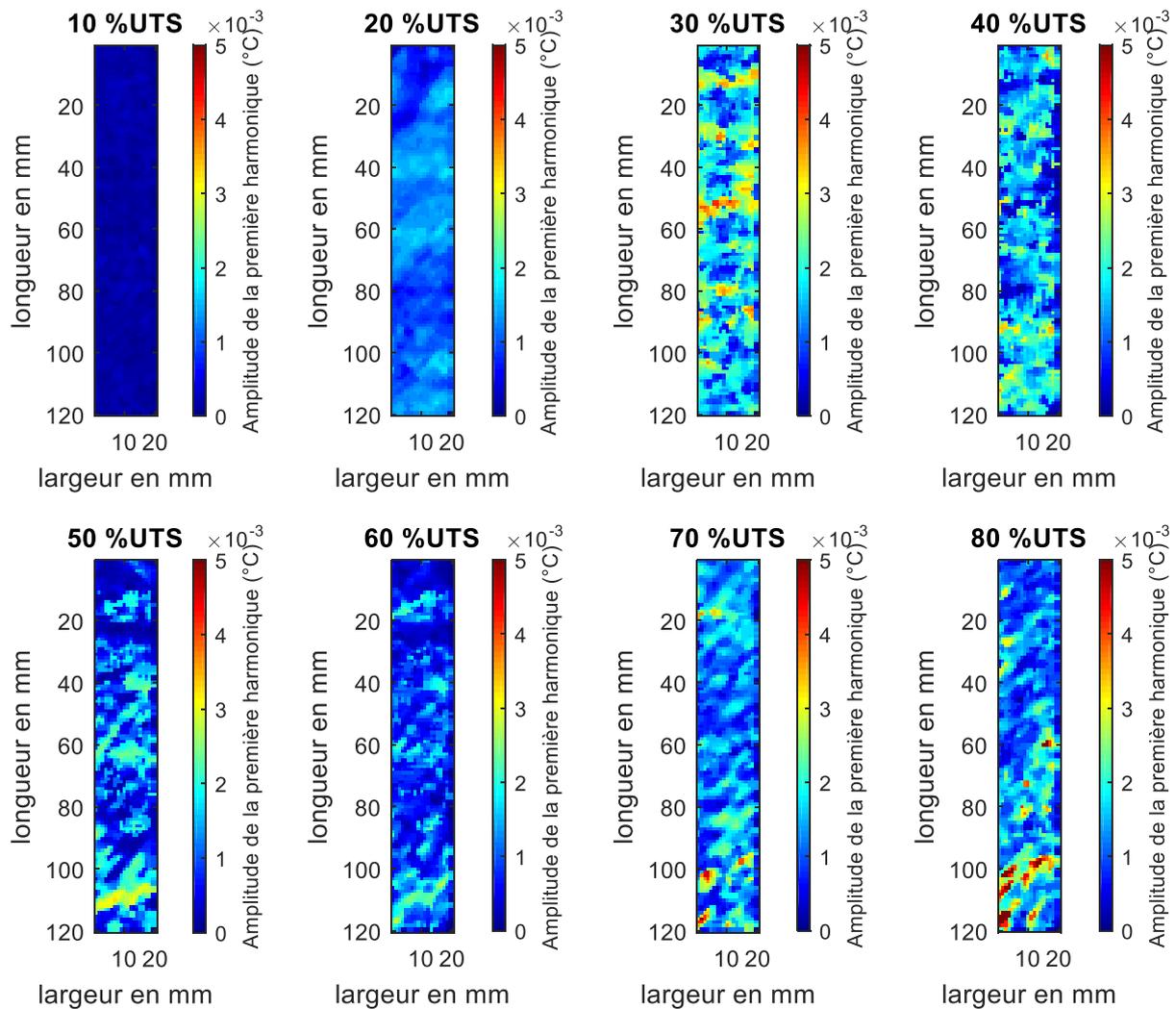


figure III-4 : Cartographies de l'amplitude thermique de la première harmonique en °C

La zone de ruine finale du matériau est identifiée dans la partie inférieure de l'éprouvette avec une amplitude thermique maximale lors du chargement à 80% UTS (dernier chargement mécanique sans rupture).

Les zones évaluées comme étant endommagées ne présentent pas de continuité : une zone dégradée lors d'un chargement mécanique n'est pas identifiée comme telle lors du bloc de fatigue suivant. Ceci peut être expliqué par la réévaluation des paramètres de la corrélation d'un chargement à un autre.

La caractérisation de l'endommagement du matériau à l'aide du paramètre de l'amplitude thermique de la première harmonique introduit également une sensibilité moins importante à la séquence d'empilement du matériau (absence d'effets visibles à 45° ou 90°).

La phase de la première harmonique n'apporte pas de possibilités de caractérisation complémentaires aux résultats précédents. Aussi, sa cartographie ne sera pas présentée ici.

#### **III.1.4. Bilan**

L'étude de l'endommagement des composites carbone/époxy sollicités en fatigue par thermographie infrarouge passive a mis en œuvre une nouvelle fonction de régression des données de thermographie permettant la visualisation du comportement du matériau dans les domaines transitoire et permanent ainsi que l'effet thermoélastique des cycles de fatigue sur l'endommagement.

Cette régression a été appliquée lors d'essais d'auto-échauffement réalisés dans l'enceinte d'isolation. Les données enregistrées par la caméra infrarouge ont alors été utilisées pour le calcul de régression afin de générer des cartographies à l'échelle millimétrique pour chaque paramètre calculé.

Sept paramètres de sorties ont été obtenus avec la régression. Tous ne présentent pas un intérêt pour l'évaluation de l'endommagement. Le suivi global de l'augmentation de température du matériau a été réalisé à l'aide de la température de stabilisation. La caractérisation des zones endommagées a été obtenue au moyen de plusieurs paramètres (amplitude thermique et phase du mode fondamental ainsi que l'amplitude thermique de la première harmonique). Utilisé seul, aucun paramètre présenté ne permet une évaluation complète de la dégradation du matériau.

Chaque indicateur présenté apporte une information complémentaire pour la caractérisation de l'endommagement par thermographie infrarouge passive. L'ensemble de ces données sera utilisé dans la suite de l'étude à des fins de fusion de manière à fournir une évaluation plus précise de l'endommagement du composite.

### **III.2. Corrélation d'images numériques**

La méthode de corrélation d'images numériques a été mise en œuvre lors des essais d'auto-échauffement afin de caractériser l'état d'endommagement du matériau. L'obtention de paramètres calculés par le logiciel Vic 3D comme les déformations ou encore l'aire de l'hystérésis permettent l'évaluation de la dégradation du composite. L'utilisation de la

corrélation d'images permet, à l'instar de la thermographie infrarouge, de générer des cartographies de déformations du matériau permettant l'identification des zones à fortes concentrations de contraintes.

A l'échelle de l'éprouvette, une nouvelle méthode basée sur l'analyse de l'aire de l'hystérésis est développée afin d'identifier le seuil d'endommagement critique du composite.

### III.2.1. Caractérisation de l'hystérésis

#### III.2.1.1. Cycles d'hystérésis

L'analyse de l'hystérésis des cycles de fatigue est couramment utilisée pour la caractérisation de l'endommagement. Ces cycles d'hystérésis générés en continu durant la sollicitation de fatigue évoluent en fonction de la durée de sollicitation mécanique (figure III-5). Les variations d'un bloc de fatigue à l'autre et au sein d'un même chargement mécanique sont utilisées afin d'évaluer la propagation de l'endommagement dans le matériau. L'évolution de l'aire peut alors servir à caractériser l'hystérésis du matériau. Ce paramètre est analysé à l'échelle de l'éprouvette d'un point de vue global et à l'échelle du  $\text{mm}^2$ .

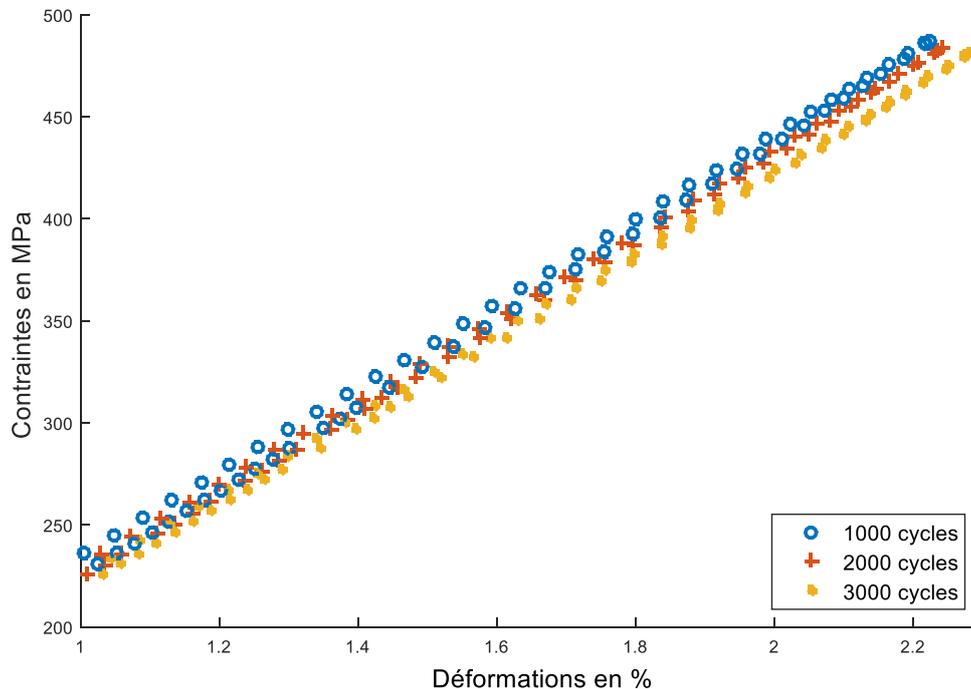


figure III-5 : Evolution de l'hystérésis suivant le nombre de cycles à 80% de charge

L'évaluation de l'aire de l'hystérésis correspond à l'énergie dissipée par unité de volume du matériau lors d'un cycle de chargement mécanique. Elle est directement liée à l'énergie de déformation dissipée par le matériau, elle-même corrélée avec la quantité de chaleur dissipée par thermographie infrarouge [122] et peut donc être utilisée comme indicateur d'endommagement en fatigue [16, 149].

### III.2.1.2. Aire de l'hystérésis à l'échelle de l'image

Dans un premier temps, l'évolution de l'énergie de déformation du matériau est évaluée au niveau de l'éprouvette au sens macroscopique. Un cycle complet de fatigue est reconstitué comme décrit au chapitre II.

L'aire de l'hystérésis atteint une valeur maximale lors des premiers cycles de chaque bloc de fatigue. La dissipation d'énergie de déformation tend alors à diminuer vers une valeur asymptotique propre à chaque chargement de fatigue (figure III-6). Pour chaque bloc de sollicitation mécanique, l'aire peut être considérée comme stabilisée à partir de 1000 cycles. Le seul cas particulier est le bloc réalisé à 80% UTS où une légère décroissance peut être observée pendant toute la durée du chargement mécanique.

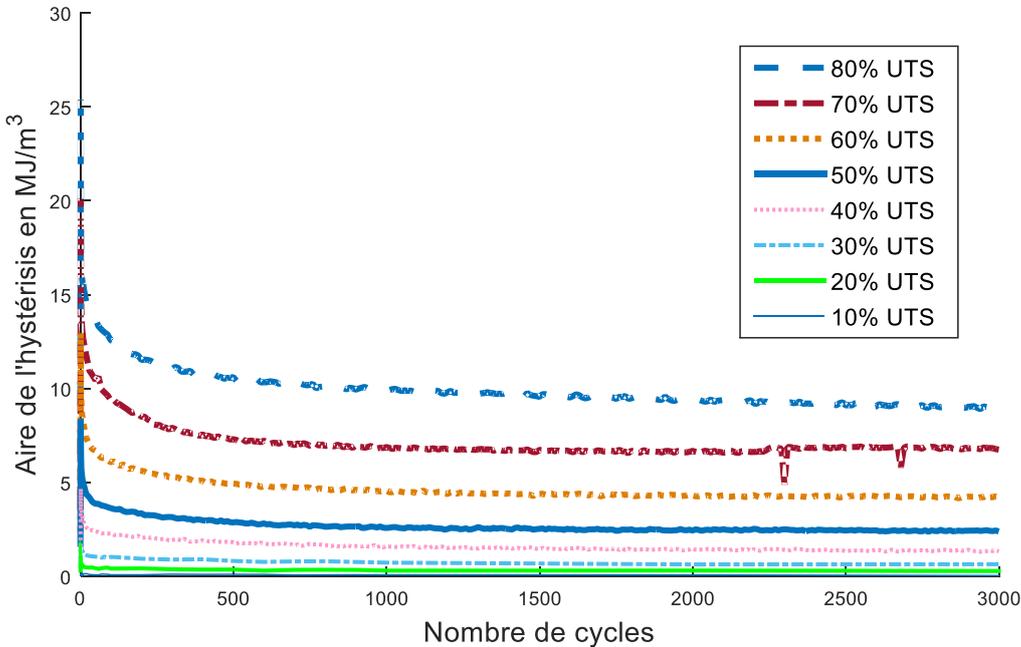


figure III-6 : Evolution de l'aire de l'hystérésis pour chaque bloc de fatigue

Ce résultat peut être mis en parallèle avec l'énergie dissipée par le matériau en thermographie infrarouge. La dissipation d'énergie de déformation observée lors des premiers cycles de chargement peut être assimilée au domaine thermique transitoire. Le domaine stabilisé de l'aire peut correspondre au domaine thermique permanent. Comme pour les températures, l'aire de stabilisation ne cesse de croître avec le chargement mécanique.

Dans le cadre de cette thèse, cette analyse est complétée en utilisant l'aire stabilisée afin de déterminer les seuils d'endommagement critique du matériau. A la fin de chaque bloc de fatigue, l'aire stabilisée correspondante est tracée en fonction du chargement mécanique appliqué. De manière similaire aux températures de stabilisation, il est possible d'identifier un changement de pente significatif permettant l'évaluation d'un seuil d'endommagement critique du matériau composite (figure III-7).

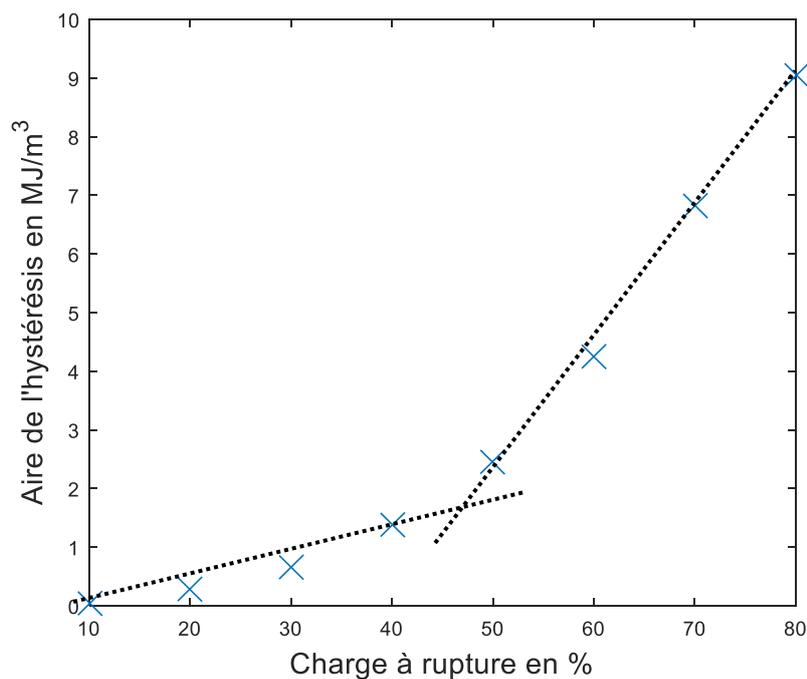


figure III-7 : Evaluation de la limite d'endurance du composite par interpolation bilinéaire en corrélation d'images numériques

Cette approche permet un gain de temps supplémentaire par rapport aux essais classiques d'auto-échauffement en fatigue. Pour obtenir cette courbe, seuls 1000 cycles sont nécessaires afin d'atteindre la stabilisation contre 3000 cycles en thermographie. De plus, le

seuil d'endommagement critique identifié ici est identique à celui évalué en thermographie infrarouge (48% UTS).

Cette méthode, inspirée de celles exploitant les températures de stabilisation, appliquée sur les données de l'aire de l'hystérésis n'a jamais été évoquée dans la littérature à notre connaissance. Elle devrait permettre d'accélérer les essais de fatigue et constituer une alternative intéressante à l'identification des seuils d'endommagement, réalisés jusque-là, par thermographie infrarouge.

### **III.2.1.3. Exploitation à l'échelle du mm<sup>2</sup>**

Le traitement de données réalisé précédemment sur l'ensemble de l'image est ensuite appliqué à l'échelle du mm<sup>2</sup>. Dans le cas de l'aire, les cartographies obtenues mettent en évidence les zones les plus dissipatives du matériau.

La caractérisation de l'endommagement est donc menée à l'aide de ce paramètre pour tous les blocs de fatigue (figure III-8). Les distributions de l'aire de l'hystérésis sont homogènes lors des quatre premiers blocs de fatigue mécanique (de 10% à 40% UTS). Ceci concorde avec le résultat obtenu au paragraphe précédent avec l'aire stabilisée.

A partir du chargement à 50% UTS, la surface du matériau dissipe davantage l'énergie de déformation. Le changement de comportement est amorcé mais la valeur de l'aire de l'hystérésis demeure homogène au sein du matériau.

Lors des chargements à 60% et 70% UTS, les distributions de l'aire de l'hystérésis présentent une partie moins dissipative au centre qu'aux extrémités du matériau générant des effets de bords. Le comportement dissipatif du composite devient ainsi hétérogène.

Les zones les plus endommagées, dans le cas du chargement à 80% de charge à rupture, sont similaires à celles détectées en thermographie infrarouge. La zone centrale du matériau apparaît très endommagée sur toute la largeur de l'éprouvette. Ce résultat valide à nouveau l'intérêt de cet indicateur d'endommagement afin de réaliser une analyse redondante entre les techniques non destructives étudiées.

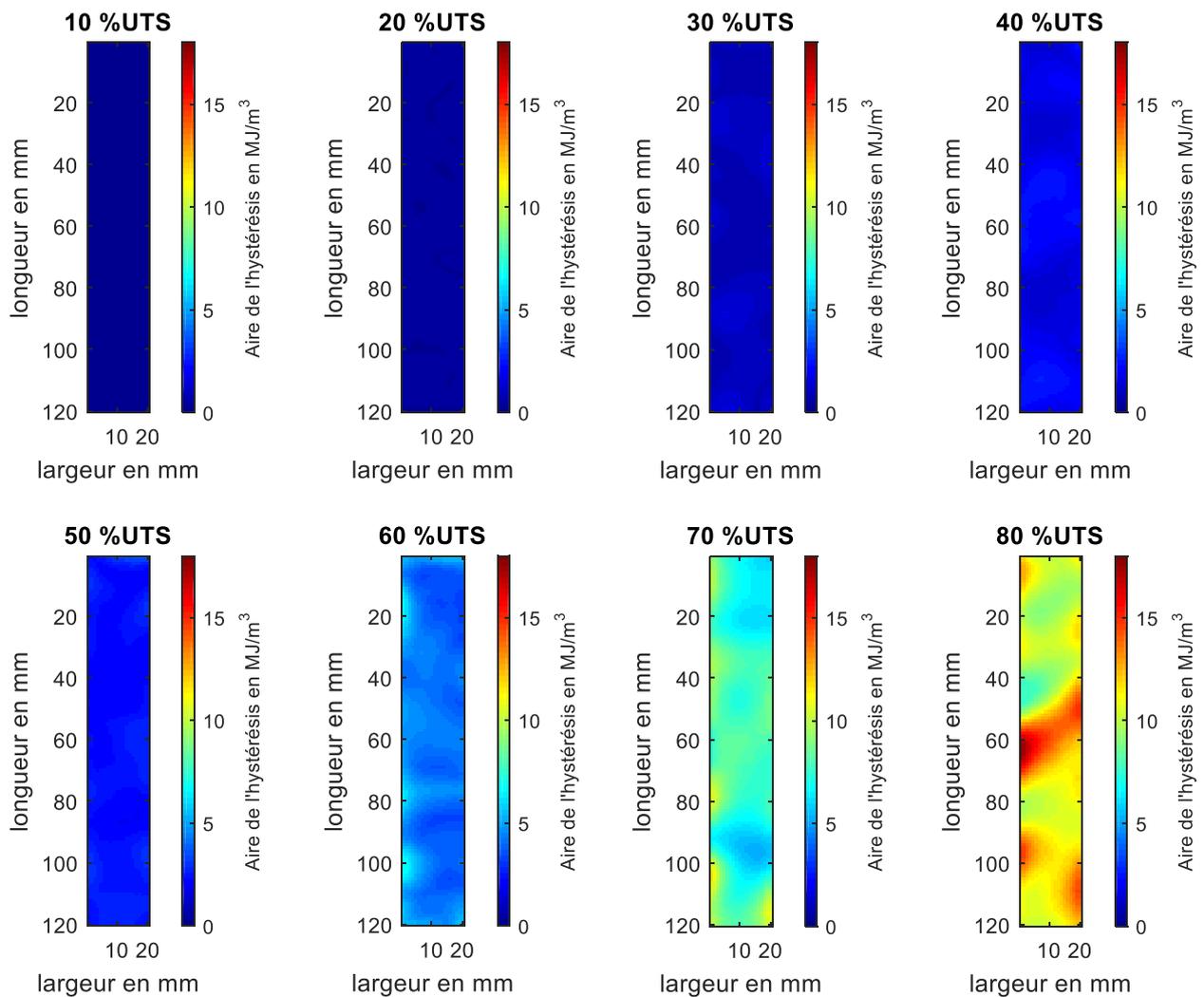


figure III-8 : Suivi de l'endommagement à l'aide de l'aire de l'hystérésis

### III.2.2. Déformations dans le sens longitudinal

Les déformations dans le sens longitudinal présentent une évolution continue durant les blocs de fatigue appliqués au matériau (figure III-9). Les distributions de déformations longitudinales sont faibles (proches de 0) lors des trois premiers blocs de chargement mécanique. La cartographie obtenue au chargement de 40% de la contrainte à rupture présente des variations de déformation sur la zone d'étude. Cette modification de comportement du composite pourrait être assimilée à la présence d'un seuil d'endommagement du matériau (comme en thermographie infrarouge). Cependant, la technique de corrélation d'images numériques ne permet pas l'identification de l'endommagement, seulement des zones avec les concentrations de contraintes les plus importantes.

Les deux chargements mécaniques suivants (50% et 60% de charge à rupture) présentent des hétérogénéités pouvant être comparées aux cartographies d’amplitude thermique du mode fondamental (les zones identifiées étant similaires).

Le chargement à 70% UTS indique des déformations plus importantes (transition de 0.5% de déformation à 0.75% de déformation en moyenne). Ce changement de comportement mécanique peut à nouveau être corrélé avec le dépassement de la limite d’endurance du composite telle que déterminée expérimentalement sur la base de la courbe de Wöhler (i.e. 60% UTS).

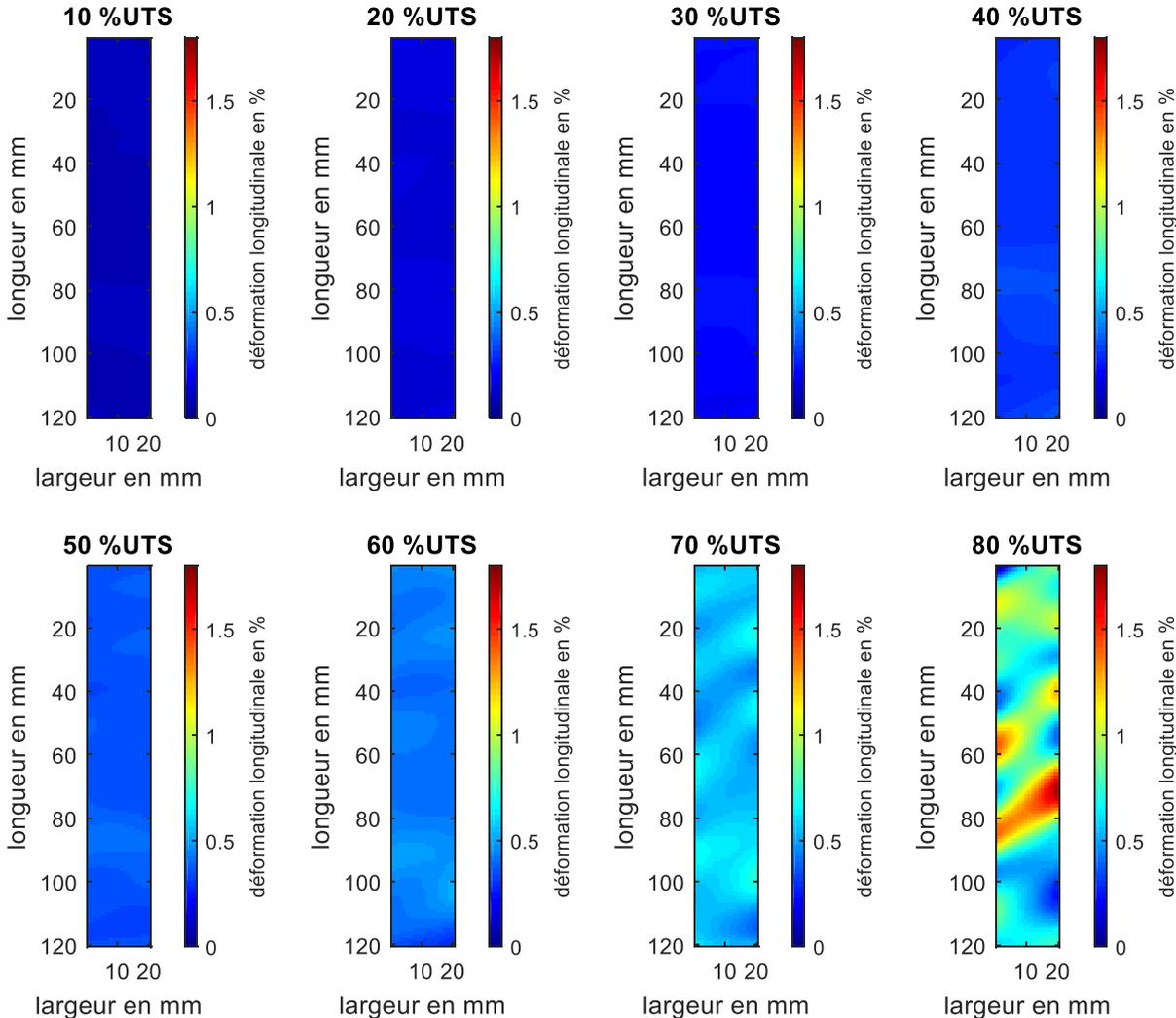


figure III-9 : Cartographies des déformations (en %) dans le sens longitudinal

Le dernier bloc de chargement mécanique (80% de charge à rupture) génère une distribution des déformations avec deux zones particulièrement endommagées au centre du matériau. L’aire de l’hystérésis ne permet l’identification que d’une seule zone globale alors que les

déformations longitudinales permettent une localisation plus fine de ces foyers d'endommagement : le premier compris entre 70 et 80mm de longueur et le second moins significatif entre 40 et 60mm de longueur.

Ce paramètre des déformations longitudinales permet de réaliser à la fois un suivi continu de l'évolution des déformations du matériau d'un bloc de chargement mécanique à un autre mais également la localisation des zones les plus sollicitées mécaniquement.

### **III.2.3. Déformations principales**

Le calcul des déformations principales, en suivi continu, permet l'obtention de cartographies des déformations afin de compléter le diagnostic de l'état de santé du matériau. L'étude étant réalisée dans le plan du composite, deux déformations principales  $e_1$  et  $e_2$  peuvent être estimées. Les données enregistrées sont alors utilisées afin de générer les cartographies correspondantes à l'échelle du  $\text{mm}^2$ .

Les paramètres  $e_1$  et  $e_2$  sont définis comme étant les valeurs propres de cette matrice. Ainsi, ces indicateurs permettent de prendre en compte l'ensemble des déformations au point de maillage étudié et non plus seulement la déformation longitudinale et/ou transversale.

#### **III.2.3.1. Première déformation principale « $e_1$ »**

La première déformation principale permet l'identification de plusieurs types de comportement mécaniques du matériau (figure III-10).

Les trois premières cartographies de la première déformation principale (de 10% à 30% UTS) ne montrent pas de déformations visibles au sein du composite. Même le bloc de fatigue à 40% UTS ne génère pas de changement de la distribution des déformations principales de la zone d'étude au contraire des deux indicateurs précédents.

De même, bien que les premières hétérogénéités apparaissent à 50% de charge à rupture, cette déformation principale  $e_1$  ne présente pas d'augmentation significative entre les cartographies à 50% et 60% UTS (différence avec les deux paramètres précédents). De ce point de vue, cet indicateur peut être considéré comme moins sensible à la propagation de l'endommagement et moins efficace pour la détection des changements de comportement mécanique du matériau.

Le chargement à 70% UTS met en évidence des déformations principales de l'ordre de 0.7% propagées à l'ensemble du matériau. L'augmentation de la valeur des déformations ainsi que le dépassement de la limite d'endurance du composite suggèrent qu'un seuil d'endommagement a été dépassé.

A la différence des déformations longitudinales, le dernier bloc de fatigue provoque une seule zone de forte déformation (plus de 1% de déformation). Cette zone identifiée avec tous les paramètres de corrélation d'images précédents ainsi qu'en thermographie infrarouge peut être considérée comme endommagée.

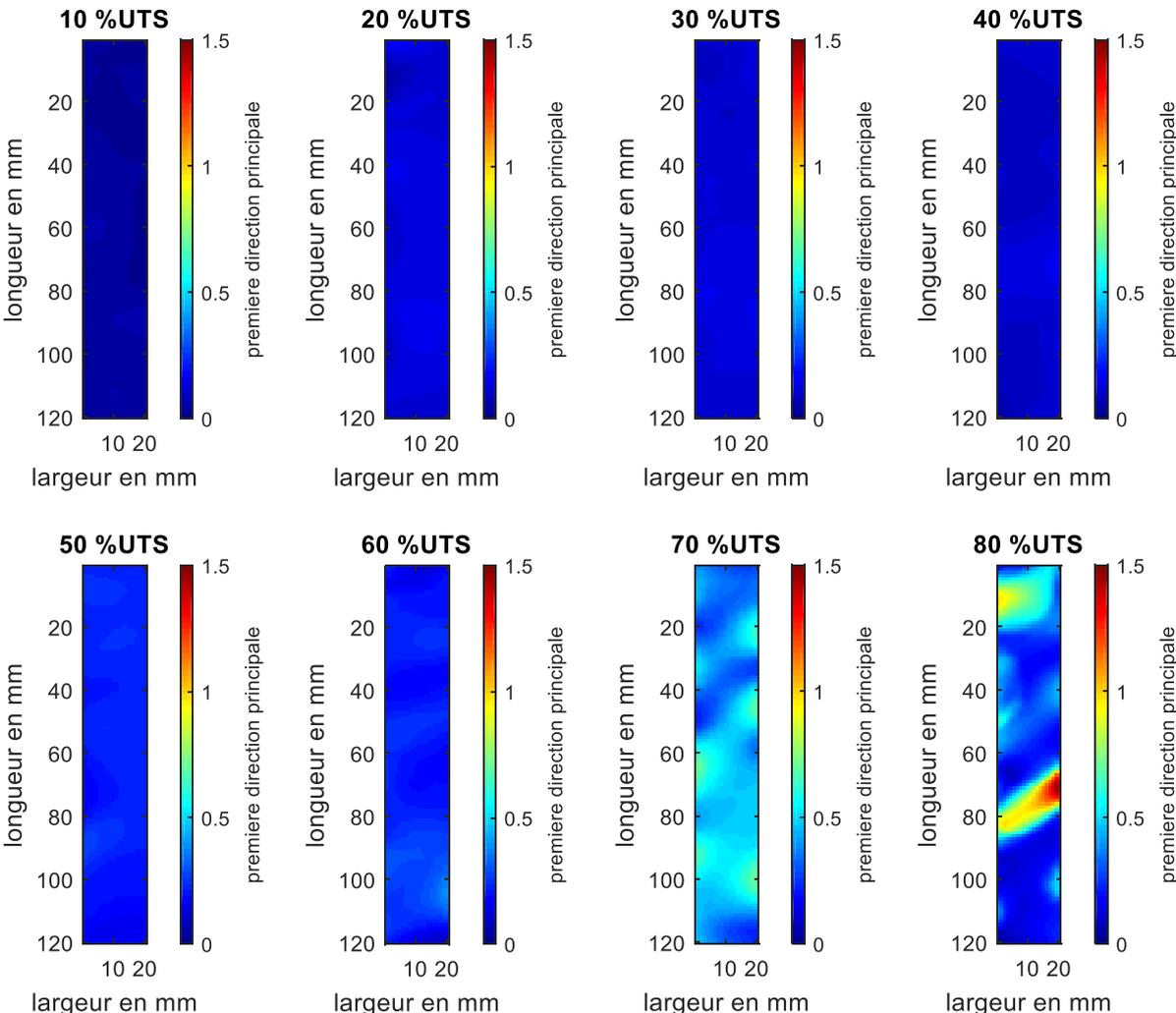


figure III-10 :Cartographies de la première déformation principale

### III.2.3.2. Seconde déformation principale « $e_2$ »

Les cartographies de la seconde déformation principale sont présentées sur la figure III-11. Contrairement à tous les précédents, cet indicateur ne permet pas une évaluation de l'endommagement global du matériau, s'il est utilisé seul.

Dans le cas des trois premiers blocs de fatigue, les distributions des déformations principales ne font pas apparaître de zones à fortes déformations. Avec le chargement à 40% UTS, la cartographie associée présente une distribution homogène (évaluée à 0.4%). Cependant, cette valeur n'est pas retrouvée lors du chargement à 50% UTS. Ainsi ce paramètre présente une sensibilité importante lors du changement de comportement mécanique à 40% de charge à rupture.

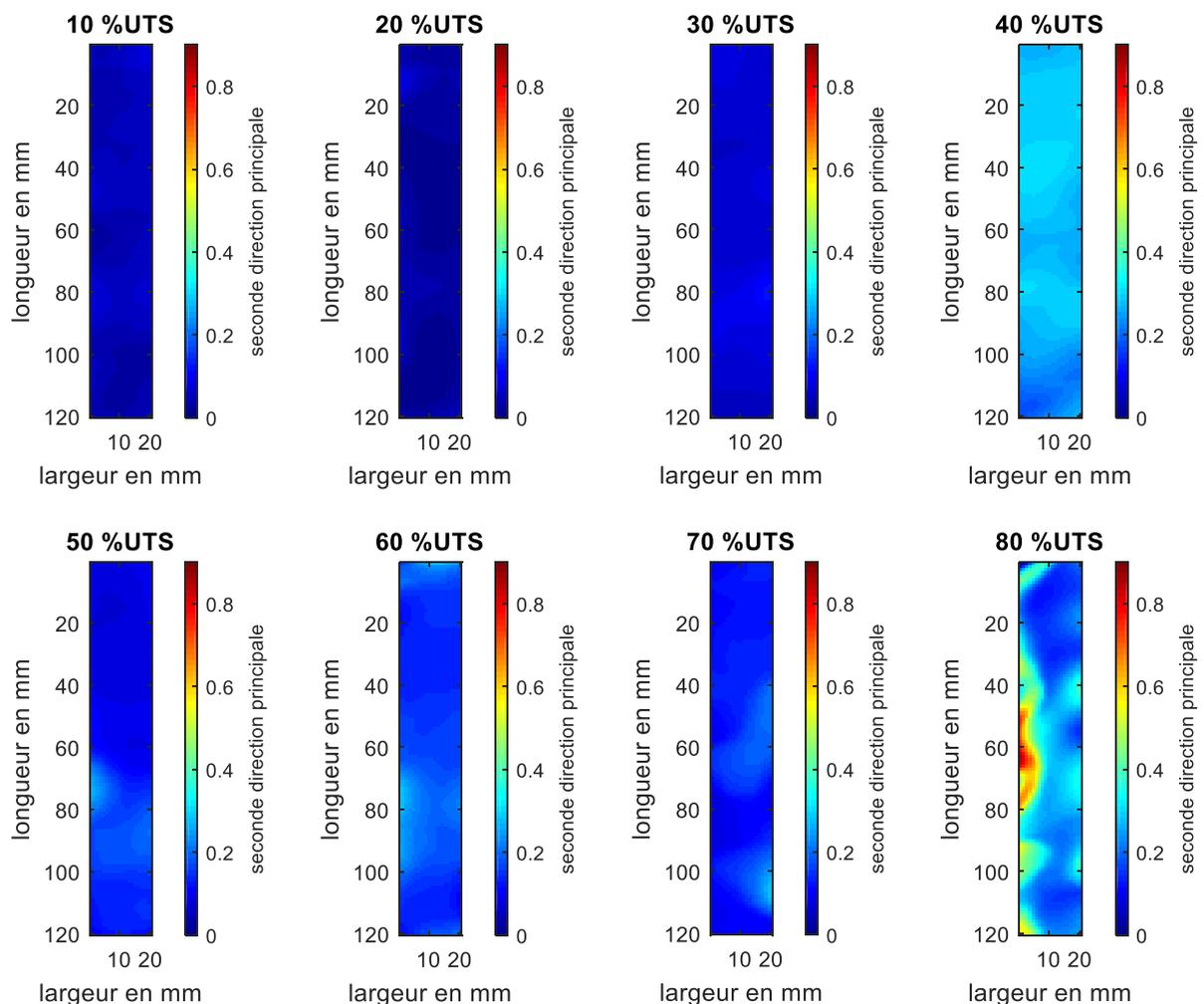


figure III-11 : Cartographies de la seconde déformation principale

Au contraire, la modification de comportement coïncidant avec le chargement mécanique à 70% UTS n'apparaît pas aussi explicitement qu'avec les indicateurs précédents. Les deux directions principales montrent donc un intérêt étant donné leurs sensibilités respectives à chacun des seuils d'endommagement du matériau.

Les valeurs maximales sont obtenues pour le dernier bloc de chargement mécanique, i.e. dans un état de rupture imminente. Elles sont localisées sur les bords mais ne permettent pas l'identification de la zone de ruine de l'éprouvette.

#### **III.2.4. Bilan**

L'étude des paramètres de corrélation d'images numériques a permis d'identifier l'évolution du comportement mécanique du composite sous chargement de fatigue lors d'essais d'auto-échauffements. Cette identification a été réalisée à l'échelle de la zone d'étude et à l'aide de cartographies du matériau.

L'aire de l'hystérésis a été exploitée pour évaluer l'énergie de déformation dissipée par le composite. De plus, les données en suivi continu ont été calculées sur des sous-parties (partitions) des données initiales. Les données de déformations ou déformations principales obtenues peuvent alors être utilisées pour l'évaluation des zones à fortes concentrations de contraintes dans le composite.

Une nouvelle méthode, inspirée du traitement de la température de stabilisation en thermographie infrarouge, a été appliquée avec l'aire de l'hystérésis stabilisée afin d'identifier le seuil d'endommagement critique du matériau d'un point de vue global. Cette méthode plus rapide et aussi efficace que la thermographie infrarouge permet de confirmer les résultats précédents. L'aire de l'hystérésis ainsi que les déformations longitudinales et principales permettent une identification des zones où les déformations sont les plus importantes. Chaque paramètre permet de mettre en exergue plus précisément un ou plusieurs comportement(s) mécanique(s) du matériau.

Dans la suite de l'étude, les différentes cartographies seront fusionnées entre elles afin d'évaluer la sensibilité des déformations, déterminées par corrélation d'images numériques, pour la caractérisation de l'endommagement. Ces résultats pourront également être

fusionnés avec les autres techniques non destructives dans le but de produire un diagnostic plus précis et fiable de la dégradation du composite.

### III.3. Acousto-ultrasons

La méthodologie détaillée au chapitre II est appliquée avant chaque bloc de fatigue lorsque le matériau est dans un état libre de charge. L'analyse des données obtenues sur un maillage par cassés de mines a été notamment complétée avec une interpolation linéaire et une fusion de données basée sur l'amplitude maximum. Ces traitements supplémentaires permettent l'obtention de cartographies aux mêmes échelles que celles des autres techniques utilisées.

#### III.3.1. Définition des indicateurs d'endommagement

Afin de quantifier la dégradation de l'état de santé du matériau, une variable d'endommagement est définie à partir de la variation de l'amplitude des signaux acousto-ultrasonores :

$$D_{amp}^i = \left| \frac{\text{Amplitude}(\text{référence}) - \text{Amplitude}(\text{chargement } i)}{\text{Amplitude}(\text{référence})} \right| \quad (\text{III.2})$$

Ce paramètre permet d'évaluer l'endommagement depuis l'état de référence (non-endommagé) du matériau. La définition de ce paramètre est similaire aux indicateurs d'endommagement définis dans les travaux de Chaki et al [172]. Un second indicateur est défini de la même manière en considérant la fréquence d'initiation.

A l'état de référence, ces indicateurs sont égaux à 0, puis ils augmentent au fur et à mesure que l'endommagement progresse. Sachant que deux capteurs ont été utilisés pour la détection des signaux de réponse du matériau aux stimulations acoustiques créées par cassés de mines, une fusion de données des deux capteurs est opérée pour améliorer le diagnostic de l'état de santé du matériau.

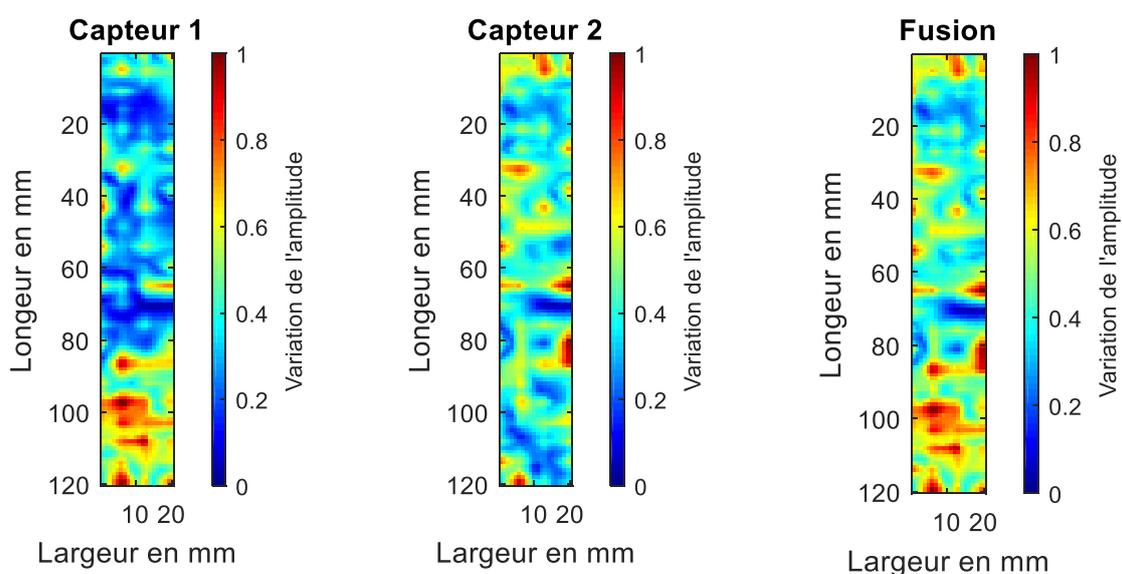
### III.3.2. Fusion des données de capteurs acousto-ultrasonores

La méthode de fusion utilisée pour les données acousto-ultrasonores est la règle de l'amplitude maximale. Elle consiste à ne conserver que l'amplitude la plus élevée parmi celles des deux capteurs (chapitre II).

Cette règle permet de mettre en évidence les résultats propres à chaque capteur sur une seule image. En effet, la propagation de l'endommagement se traduit par une augmentation de l'atténuation du matériau. La propagation des ondes acousto-ultrasonores s'en trouve réduite. Chaque capteur est alors plus à même d'évaluer la dégradation dans son voisinage.

La fusion de données est appliquée avant chaque chargement mécanique. L'intérêt de cette méthodologie par rapport à une analyse capteur par capteur est de regrouper plusieurs cartographies en une seule image tout en ne préservant que les informations les plus significatives. Les cartographies issues de chaque capteur et leur fusion sont présentées à la figure III-12.

Le capteur 1, placé en bas de la zone d'étude, indique un endommagement important dans la partie la plus basse de l'éprouvette (de 80 à 120mm de longueur). Le capteur 2, situé en haut de la zone d'étude, permet d'identifier une zone d'endommagement plus importante dans la partie supérieure de l'éprouvette (de 0 à 60mm de longueur). Les conditions de mesures des deux capteurs étant similaires, le résultat fusionné présente une analyse complète de la dégradation du matériau.



(a)

(b)

(c)

figure III-12 : Fusion des cartographies (a) capteur 1, (b) capteur 2 et (c) fusion des résultats précédents dans le cas d'une sollicitation mécanique à 80% de charge à rupture

Ainsi, cette stratégie de fusion de données met en valeur des informations issues des deux capteurs. Couplée aux résultats de localisation, cette méthode permet le suivi de la propagation de l'endommagement dans le matériau.

### III.3.3. Variation d'amplitude

La génération des cartographies et la stratégie de fusion associée sont appliquées à chaque bloc de chargement mécanique. L'analyse de la variation d'amplitude permet de suivre la dégradation du composite (figure III-13).

Dans le cas de faibles taux de chargement mécanique (de 10% à 40% de charge à rupture), la distribution de l'endommagement du matériau reste homogène, modéré et uniforme dans tout le volume de la zone d'étude.

Les blocs de fatigue réalisés à des niveaux de chargements plus élevés (de 50% à 70% de charge à rupture) mettent en évidence une évolution importante et hétérogène de l'endommagement :

- La zone la plus basse (80 à 120mm de longueur) est la partie la plus endommagée de l'éprouvette. Seuls quelques mm<sup>2</sup> présentent une variation d'amplitude faible et peuvent être estimés sains ; de plus aucun effet à 45° n'est visible. Ceci peut être expliqué par les limitations de caractérisation en surface de la thermographie et de la corrélation d'images numériques contrairement aux acousto-ultrasons qui se propagent dans toute l'épaisseur du matériau. Il convient cependant de vérifier que cette caractérisation hors contrainte peut être comparée avec une caractérisation réalisée sous contraintes.
- La partie supérieure de l'éprouvette n'est pas homogène mais présente un endommagement plus limité. La variation d'amplitude est plus faible dans cette zone (0 à 60 mm de longueur) avec la présence locale de petits foyers d'endommagement (résultat étayé par les techniques précédentes).

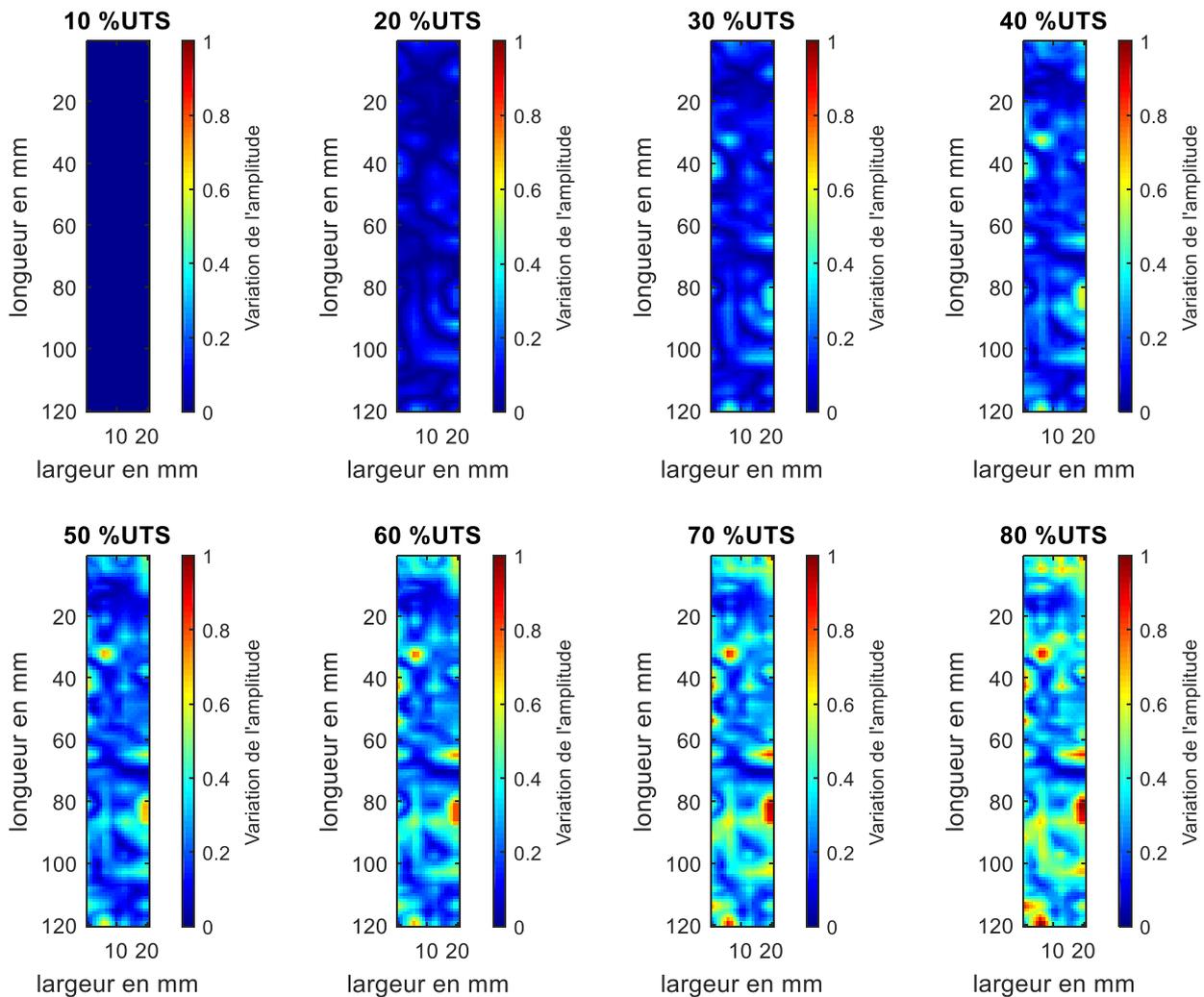


figure III-13 : Evolution de la variation de l'amplitude pour le suivi de l'endommagement mécanique

A 80% de charge à rupture, l'endommagement s'est propagé à l'ensemble du matériau. Une dégradation cotée à 1 induit une atténuation de l'onde enregistrée d'au moins 40dB par rapport au matériau sain, soit une quasi-extinction. Le matériau n'étant plus assez rigide pour permettre la transmission d'une onde, on peut l'estimer proche de la ruine mécanique.

Cette méthode met en évidence les différents comportements acousto-ultrasonores identifiés par chaque capteur. De plus, les cartographies obtenues permettent une visualisation de la propagation de l'endommagement hors-contraainte.

### III.3.4. Variation de fréquence d'initiation

La fréquence d'initiation est le second paramètre utilisé afin de caractériser l'endommagement (figure III-14). Le changement d'indicateur permet également de mettre

en évidence des foyers d'endommagement différents de ceux détectés en exploitant la variation d'amplitude.

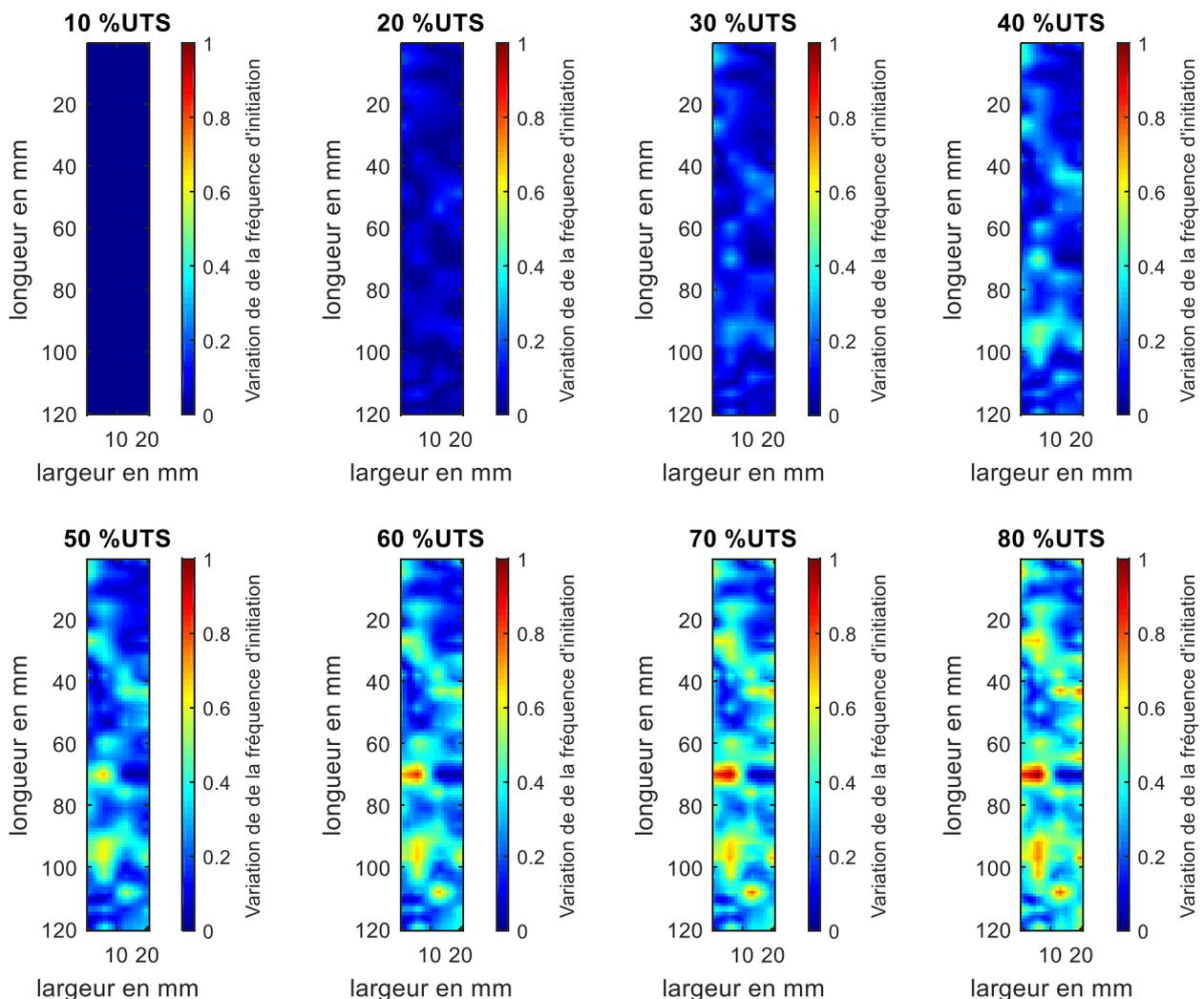


figure III-14 : Evolution de la variation de la fréquence d'initiation pour le suivi de l'endommagement mécanique

La tendance globale en termes d'endommagement est similaire à celle observée sur la base de la variation d'amplitude. L'intérêt de ce second paramètre réside dans sa capacité à localiser des foyers d'endommagement différents.

Cet indicateur permet notamment de mieux identifier la zone de transition entre la partie supérieure et inférieure de l'éprouvette (ligne à 70mm correspondant à une forte puis une faible variation de la fréquence). Cette particularité au centre de l'éprouvette semble être liée au procédé de fabrication de la plaque composite dans la mesure où elle est présente sur toutes les éprouvettes testées.

L'utilisation de la variation de la fréquence d'initiation introduit également une situation de conflit dans plusieurs zones du matériau si les paramètres sont comparés, par exemple dans la partie supérieure de l'éprouvette.

Tout comme il est possible d'attribuer à un mécanisme d'endommagement une signature acoustique, il est envisageable que certains paramètres soient plus sensibles à un mécanisme spécifique d'endommagement.

### **III.3.5. Bilan**

Les acousto-ultrasons développés dans cette thèse permettent une localisation de l'endommagement dans un cadre hors contrainte. Cette méthodologie innovante est fiable et robuste. Elle intègre également une possibilité de fusion de données basée sur les ondes enregistrées (capteur 1 et capteur 2). La localisation de l'endommagement et le suivi de sa propagation durant la vie du composite permet de compléter l'analyse obtenue avec les autres techniques de contrôle non destructif.

## **III.4. Emission acoustique**

L'enregistrement des émissions acoustiques a été réalisé, in-situ, en même temps que la thermographie infrarouge et la corrélation d'images numériques. L'endommagement a été évalué à l'aide des paramètres conventionnels (effet Kaiser, rapport Félicity et amplitude) et de la localisation par réseaux de neurones (configurations : un ou deux capteurs).

### **III.4.1. Effet Kaiser et rapport Félicity**

L'effet Kaiser désigne la nature irréversible des émissions acoustiques. Il est défini comme l'absence d'émissions acoustiques lors d'une sollicitation mécanique si la contrainte appliquée  $\sigma_2$  est inférieure à un chargement antérieur réalisé à  $\sigma_1$ . Si un matériau ne respecte pas ce critère, il est considéré comme endommagé. Il est alors possible de définir le rapport Félicity :  $R_f = \sigma_2 / \sigma_1$ .

Afin d'évaluer l'état d'endommagement du matériau à partir de ces paramètres, les ondes acoustiques sont présentées en fonction du chargement mécanique (figure III-15). A taux de chargement croissant, une augmentation de la densité d'évènements acoustiques est

constatée. Cependant, ceux-ci ne sont pas localisés sur la partie supérieure des cycles de fatigue correspondant aux contraintes les plus importantes.

Lors des blocs de chargements réalisés à 20% ou 40% de charge à rupture, les ondes acoustiques sont dispersées et peu nombreuses. Les chargements à 60% et 80% UTS génèrent un nombre plus élevé d'ondes acoustiques réparties sur l'ensemble des cycles. Ainsi, le composite ne respecte pas l'effet Kaiser.

Les évènements acoustiques se produisant indifféremment aux maxima ou minima de la sollicitation mécanique, il n'est pas envisageable d'évaluer un rapport Félicity plus significatif que le ratio R utilisé pour la fatigue soit  $R=0.1$ .

Ces paramètres conventionnels hérités des matériaux métalliques peuvent théoriquement aussi être appliqués aux matériaux composites. Toutefois, il semblerait que ces indicateurs présentent ici un intérêt limité pour cette étude. La seule conclusion pertinente est l'apparition d'endommagement précoce (dès 20% de charge à rupture) dans le composite du fait du non-respect de l'effet Kaiser.

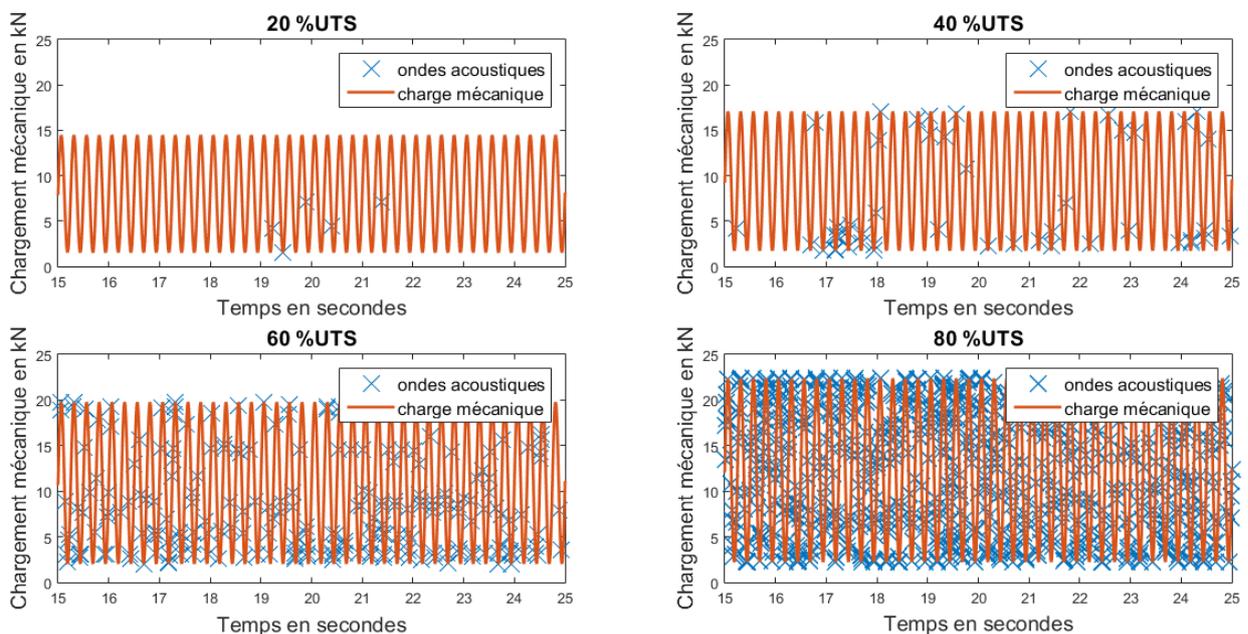


figure III-15 : Slaves acoustiques enregistrées en fonction du chargement mécanique appliqué pour des blocs de fatigue croissants

### III.4.2. Evolution de l'amplitude

Le suivi de l'amplitude est réalisé en continu tous les 100 cycles de fatigue permettant l'identification de seuils d'endommagement du matériau (figure III-16).

Un seuil d'endommagement critique à 40% UTS est observé avec le début d'augmentation continue de l'amplitude acoustique. Un second seuil d'endommagement, associable au dépassement de la limite d'endurance déterminée via la courbe de Wöhler (i.e. 60% UTS), est caractérisé par une nouvelle rupture de pente. Au-delà de ce second seuil de dégradation, l'amplitude acoustique présente une croissance plus rapide pouvant être assimilée au début de la phase de ruine mécanique de l'éprouvette composite. Enfin, une croissance exponentielle (effet d'emballlement) apparaît à la fin du chargement à 80% de charge à rupture (proximité de la défaillance ultime).

Un comportement atypique est détecté lors du premier bloc de fatigue avec l'apparition d'une amplitude importante (50dB) suivie d'une baisse observée à la fin du bloc de fatigue avec le minimum d'amplitude observable à 40dB. Ce comportement peut être attribué à une phase d'accommodation initiale associée à des micro-ruptures et défauts micro-structuraux.

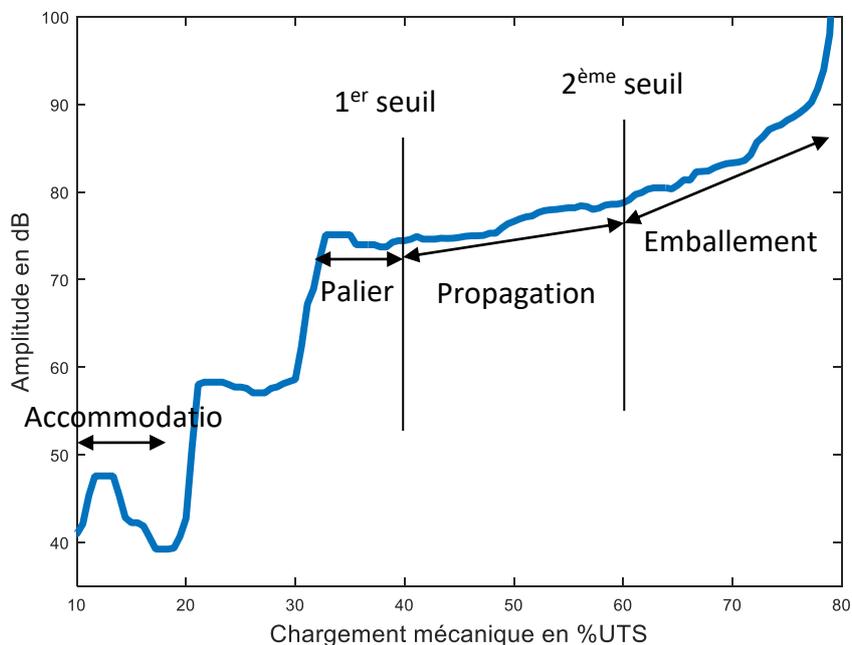


figure III-16 : Evolution de l'amplitude en continu sur l'ensemble des blocs de fatigue

### III.4.3. Localisation des évènements acoustiques

En utilisant des réseaux de neurones, il est possible de générer des cartographies à partir des enregistrements de chaque capteur individuellement ou des deux groupes de données issues des 2 capteurs simultanément. Le premier cas présente l'intérêt de localiser toutes les ondes reçues par le capteur considéré tandis que le second permet une vérification de la détection de la même onde acoustique par les deux capteurs (figure III-17).

La différence principale entre ces deux approches est la sensibilité au bruit. Avec deux capteurs, il est possible de réaliser un filtrage supplémentaire sur les évènements enregistrés, basé sur le temps caractéristique de propagation de l'onde au sein de l'éprouvette. Si la différence des temps d'arrivée aux capteurs est supérieure à ce temps caractéristique, l'évènement est alors localisé hors de la zone d'étude et est assimilé à du bruit. Cette méthode peut cependant classer comme étant du bruit un évènement acoustique réel s'il n'est détecté que par un seul capteur. Dans le cas de l'utilisation d'un seul capteur, l'ensemble des évènements enregistrés est alors traité par les réseaux de neurones pour la localisation avec un filtrage basé sur les données d'entraînement.

Une comparaison de ces deux configurations est présentée sur la base des cartographies de localisation associées aux capteurs 1 et 2 considérés séparément puis ensemble (figure III-17). La légende mentionne seulement plusieurs centaines d'évènements localisés, alors qu'un bloc de fatigue réalisé à plus de 40% UTS génère plusieurs milliers d'ondes acoustiques. Cette différence s'explique par la répartition des données sur la surface du matériau et non plus sur une ligne.

Dans le cas de capteurs utilisés individuellement le nombre d'évènements acoustiques sur l'éprouvette est élevé : 300 pour le capteur 1 et 400 pour le capteur 2. De plus, la zone endommagée est liée à l'emplacement du capteur (capteur 1 placé en bas de l'éprouvette et capteur 2 en haut). A l'inverse, le nombre d'évènements acoustiques localisés par les deux capteurs simultanément est nettement plus faible (au maximum 50 évènements pour  $1\text{mm}^2$ ). Ce nombre réduit est lié à la sévérité introduite par le filtrage des données.

Afin d'assurer la fiabilité des résultats et la non prise en compte du bruit de la machine de fatigue sur les cartographies, seul le cas de localisation avec les deux capteurs est présenté dans la suite. La localisation avec un seul capteur reste cependant une perspective d'étude.

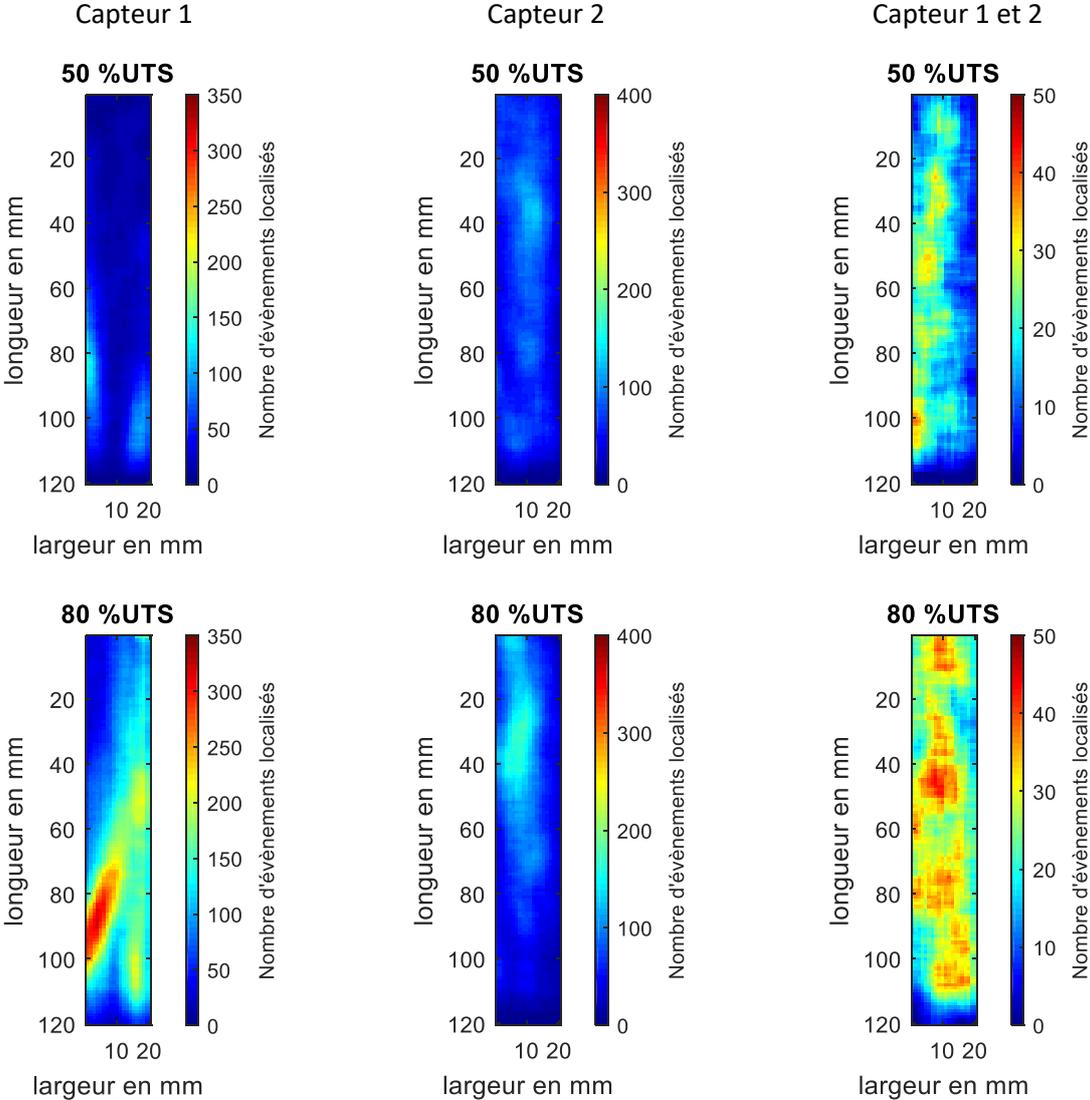


figure III-17 : Comparaison des résultats de localisation suivant la configuration utilisée (capteurs seuls ou ensemble)

### III.4.4. Cartographies du nombre d'évènements pour l'évaluation de l'endommagement

Le suivi de l'endommagement est réalisé en continu et permet l'identification des zones les plus endommagées. La figure III-18 illustre les distributions de nombre d'évènements localisés à chaque mm<sup>2</sup> du matériau lors des blocs de fatigue. Les cartographies présentées

permettent la visualisation de l'ensemble des évènements acoustiques enregistrés sur le chargement de fatigue considéré.

Lors des quatre premiers niveaux de chargement mécanique, le nombre d'évènements détectés est faible (<5 évènements pour 1 mm<sup>2</sup>). Néanmoins, ceux-ci localisent l'endommagement au centre de l'éprouvette composite (cartographies à 30% UTS et 40% UTS).

La cartographie à 50% UTS fait apparaître les premières hétérogénéités dans la distribution du nombre d'évènements. Les zones les plus endommagées sont localisées majoritairement au centre de la zone d'étude.

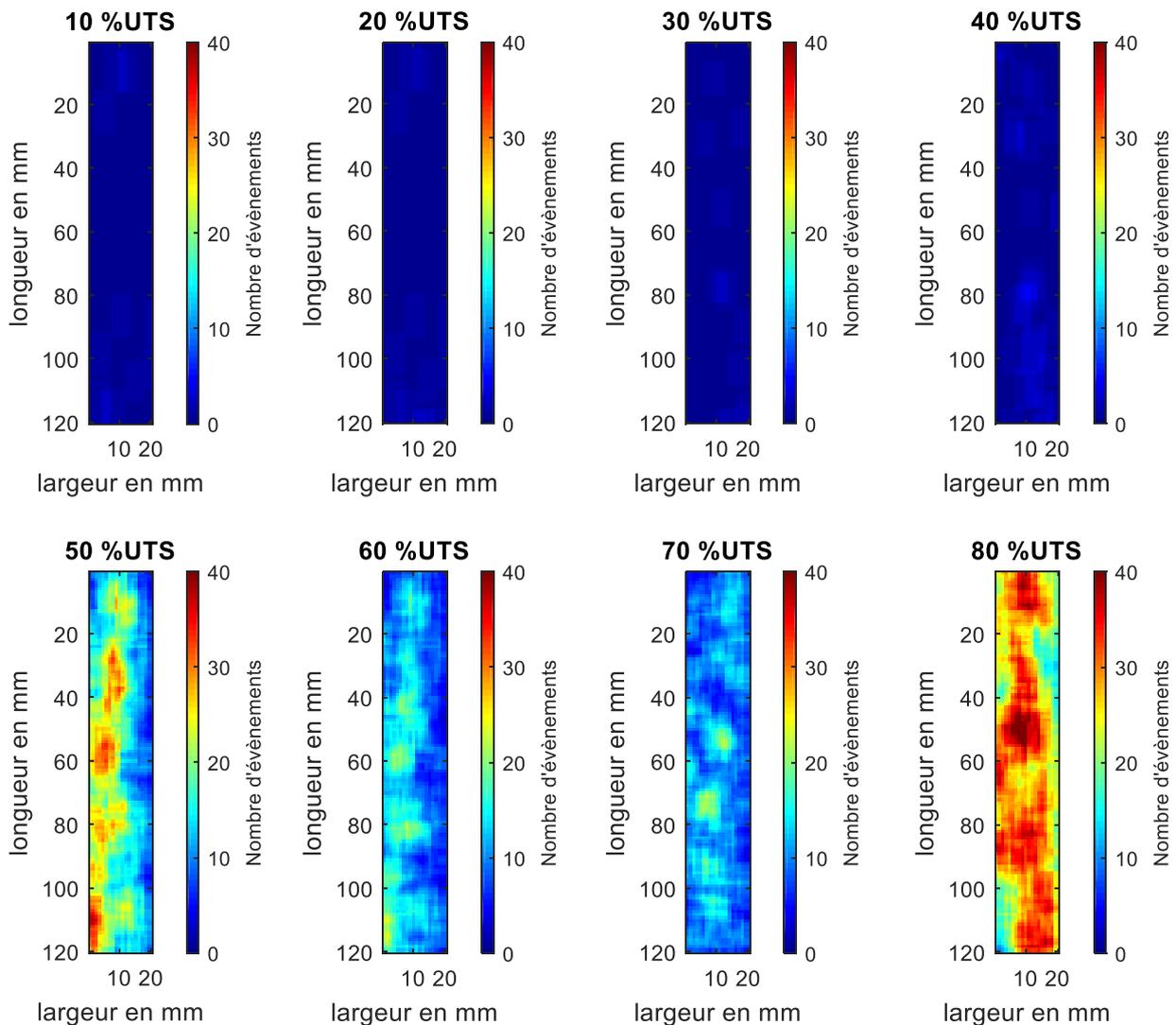


figure III-18 : Suivi de l'endommagement mécanique à l'aide du nombre d'évènements localisés

Les localisations du nombre d'évènements à 60% et 70% UTS permettent un suivi des zones identifiées comme endommagées (validation de la méthode avec des réseaux différents) malgré une diminution du nombre d'évènements acoustiques d'un point de vue global.

La dernière cartographie, réalisée à 80% de charge à rupture, est aussi celle impliquant le plus grand nombre d'ondes acoustiques. L'endommagement s'est alors propagé à l'ensemble de l'éprouvette, y compris sur les bords.

Ces résultats de localisation mettent en évidence l'amorçage de l'endommagement au centre de l'éprouvette ainsi que sa propagation vers les bords. La robustesse de la méthode déjà évaluée précédemment est à nouveau vérifiée, les zones endommagées pouvant être suivies d'un chargement à un autre et en continu.

#### **III.4.5. Bilan**

Les outils classiques de l'analyse acoustique ont été utilisés avec un succès limité pour l'effet Kaiser et le rapport Felicity. L'évaluation des seuils d'endommagement a été, quant à elle, réalisée en considérant la variation d'amplitude des ondes acoustiques. Cette analyse permet l'identification des seuils d'endommagement du matériau d'un point de vue global.

La localisation par réseaux de neurones a par ailleurs été mise en œuvre et appliquée lors de chaque bloc de fatigue. Les cartographies obtenues permettent de visualiser la propagation de l'endommagement sous chargement mécanique. Il s'agit également de la seule méthode de suivi in-situ n'étant pas affectée par les effets de la séquence d'empilement du composite, les émissions enregistrées permettant une caractérisation volumique du matériau.

Les données issues de cette technique de contrôle non destructif pourront ainsi être utilisées dans la suite de l'étude afin d'être fusionnées avec celles des autres techniques.

#### **III.5. Cartographies ultrasonores**

L'endommagement induit par les blocs de chargement en fatigue a été caractérisé hors contrainte sur la base de cartographies ultrasonores en mode C-scan en transmission. A

cette fin, les amplitudes temporelles et la vitesse dans l'épaisseur du matériau ont été analysées.

### III.5.1. Evolution de l'amplitude temporelle dans l'épaisseur

L'amplitude relative définie par rapport à l'état de référence du matériau est utilisée comme indicateur d'endommagement.

$$D_{C-scan}^{amp,i} = \left| \frac{Amplitude(référence) - Amplitude(chargement i)}{Amplitude(référence)} \right| \quad (III.3)$$

La figure III-19 présente les cartographies de variation relative de l'amplitude obtenues lors des essais d'auto-échauffement. Elles présentent des hétérogénéités dès les premiers niveaux de chargement mécanique. Ces variations restent limitées (0.4 au maximum) et localisées au centre de l'éprouvette. Un premier seuil d'endommagement est identifiable à 40% de charge à rupture où l'endommagement global est évalué à 0.5 en variation d'amplitude relative. Lors du bloc de chargement suivant à 50% UTS, la variation d'amplitude relative est à nouveau estimée à environ 0.35 sur l'ensemble de la distribution d'endommagement du matériau. On constate ainsi que l'endommagement n'est pas évalué de manière continue à l'aide de ce paramètre lorsque le chargement mécanique est inférieur à la limite d'endurance du matériau.

Lors des trois derniers chargements mécaniques (60%, 70% et 80% UTS), l'endommagement se propage à l'ensemble de la zone d'étude tant d'un point de vue quantitatif (dimension des zones endommagées) que d'un point de vue qualitatif (amplitude relative croissante lors de ces blocs de fatigue). Enfin, le dernier chargement illustre l'état de défaillance quasi-ultime du composite avec l'extinction de l'onde transmise dans le cas de certaines zones scannées.

L'utilisation de ce paramètre permet ainsi la localisation des zones les plus endommagées de l'éprouvette. La capacité de détection de la dégradation du composite dès les premiers blocs de fatigue est un résultat spécifique à cet indicateur d'endommagement.

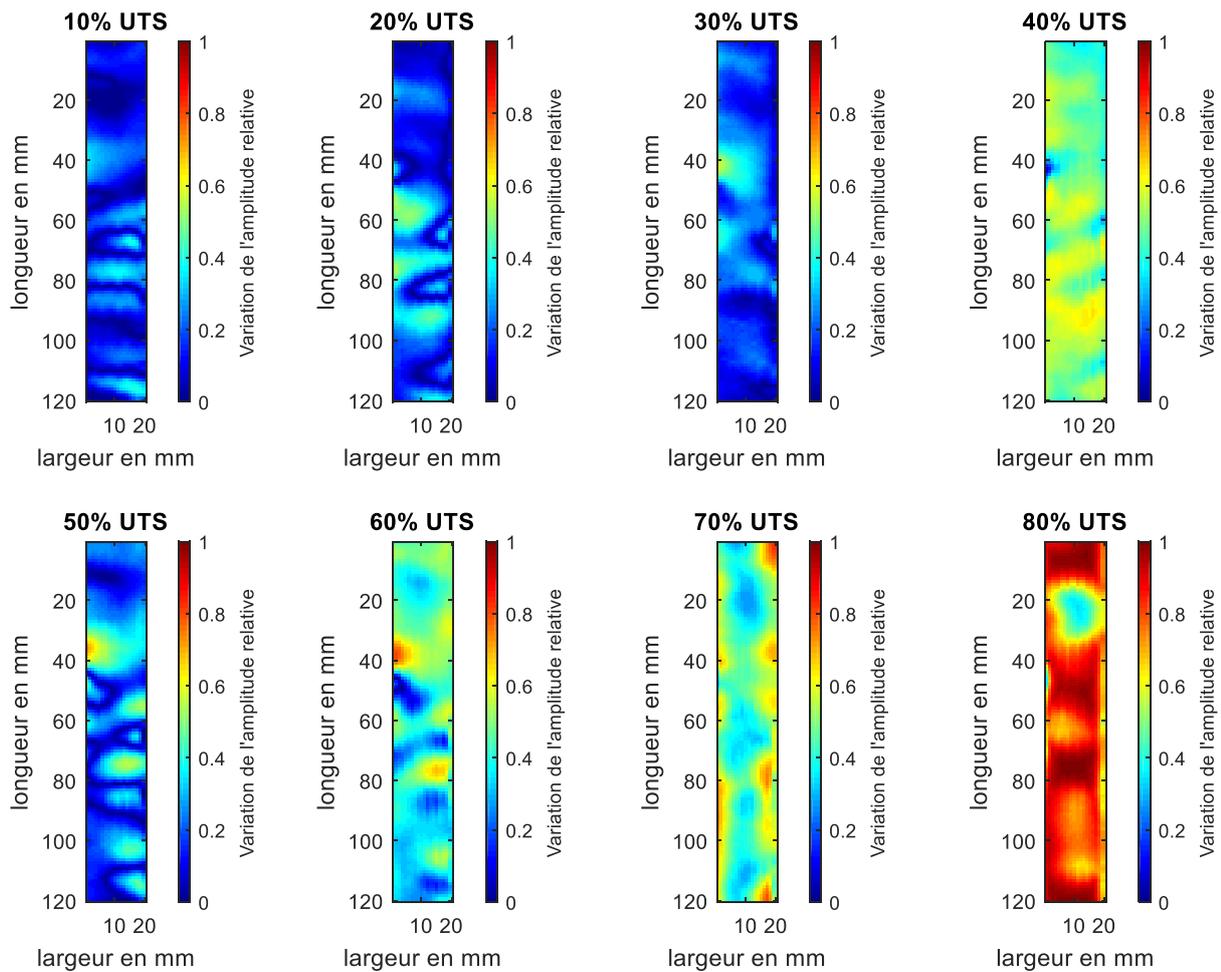


figure III-19 : Cartographies de l'amplitude transmise en caractérisation ultrasonore

### III.5.2. Evolution de la vitesse dans l'épaisseur

Autre indicateur d'endommagement, la vitesse dans l'épaisseur du matériau est évaluée à l'état de référence et après chaque bloc de fatigue. L'évolution de ce paramètre dans le cas des différents chargements mécaniques est illustrée à la figure III-20.

Les distributions des vitesses ne présentent que de faibles disparités au sein d'une image. Seule la cartographie obtenue lors du chargement mécanique à 80% UTS permet une localisation des zones les plus endommagées du matériau. Aussi, seules les vitesses moyennes en fonction du chargement mécanique appliqué sont présentées avec la cartographie du dernier bloc de fatigue.

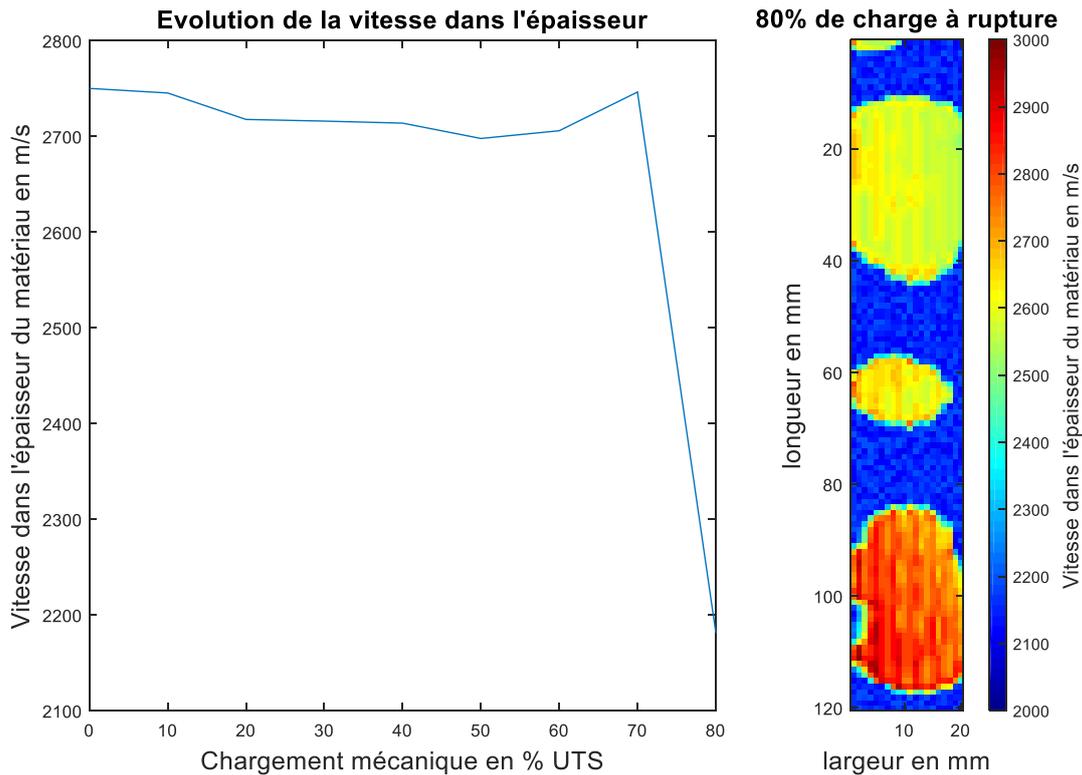


figure III-20 : Cartographies du temps de vol en caractérisation ultrasonore

La vitesse moyenne dans l'épaisseur du matériau peut être considérée comme quasi-constante durant l'ensemble des blocs de chargement mécanique. Seule la dernière sollicitation mécanique génère une baisse significative de cette caractéristique du composite et peut être associée à sa ruine imminente. Ce résultat est similaire à celui obtenu par Harizi et al. [173] lors d'une caractérisation C-scan d'un composite verre/époxy sollicité en traction par chargements successifs et croissants (0MPa, 50MPa, 100MPa, ...).

La cartographie des temps de vol réalisés à 80% UTS permet d'identifier la partie centrale de l'éprouvette comme fortement endommagée. Une petite zone (55 à 65mm dans le sens de la longueur) présente une vitesse dans l'épaisseur cohérente avec le type de matériau étudié. La présence de zones fortement endommagées de part et d'autre permettent de valider les résultats des autres techniques : par exemple la corrélation d'images numérique où une à deux zones endommagées étaient identifiées au centre de l'éprouvette. Ce paramètre, bien que ne présentant que peu de variation durant la majorité de la vie de l'éprouvette, permet alors de lever le doute sur le nombre de zones réellement dégradées.

### III.5.3. Bilan

Des essais ultrasonores en immersion ont été réalisés avant chaque bloc de fatigue sur le composite au moyen du nouveau dispositif C-scan conçu afin d'évaluer l'amplitude temporelle et la vitesse des ondes dans son épaisseur.

La variation relative de l'amplitude temporelle permet alors d'identifier les seuils de dégradation du matériau et de localiser les zones les plus endommagées. La vitesse dans l'épaisseur peut quant à elle être considérée stable durant l'ensemble de la vie du matériau sauf lorsque l'endommagement s'est propagé à l'ensemble du matériau.

Dans le chapitre suivant, seule la variation d'amplitude temporelle sera utilisée dans le cadre de la fusion de données avec les autres techniques. En effet, les cartographies des vitesses du matériau ne présentent pas de possibilité de localisation avant la fin de la vie mécanique de l'éprouvette.

### III.6. Ondes de Lamb

Les ondes de Lamb ont été utilisées afin de caractériser l'état d'endommagement global du matériau sous contrainte mécanique. Les mesures ont été réalisées lorsque la contrainte moyenne du bloc de fatigue est appliquée au matériau avant et après les cycles de fatigue (chapitre II). Pour mener à bien cette analyse, la variation de l'amplitude temporelle est évaluée.

La propagation de l'endommagement dans le composite introduit des distorsions ultrasonores [202]. A la rupture, l'onde enregistrée présente une quasi-extinction (baisse d'au moins 40dB par rapport à l'onde enregistrée sur le matériau sain, figure III-21).

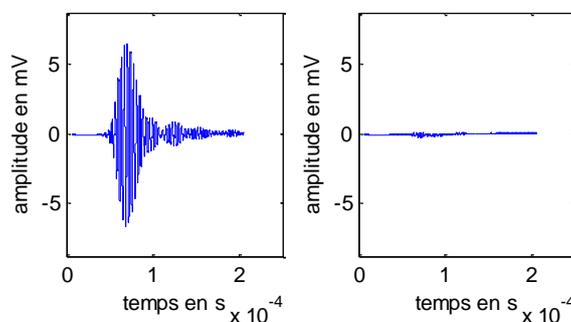


figure III-21 Influence de l'endommagement sur les ondes de Lamb (état initial et quasi-rupture)

La propagation de l'endommagement peut être suivie via l'évolution de l'amplitude temporelle relative du matériau (amplitude temporelle obtenue à la fin de chaque bloc de fatigue en comparaison de celle mesurée à la fin du premier bloc) (figure III-22) :

$$\Delta Amp(i) = \left| \frac{Amp(fin\ chargement\ i) - Amp(fin\ chargement\ 1)}{Amp(fin\ chargement\ 1)} \right| \quad (III.4)$$

Les deux premiers chargements mécaniques ne font pas apparaître de variation importante de l'amplitude temporelle du matériau (estimée à moins de 0.05). Les trois blocs de fatigue suivants permettent d'identifier l'amorçage de la propagation de l'endommagement (amplitude relative à 0.1) croissante d'un chargement à un autre.

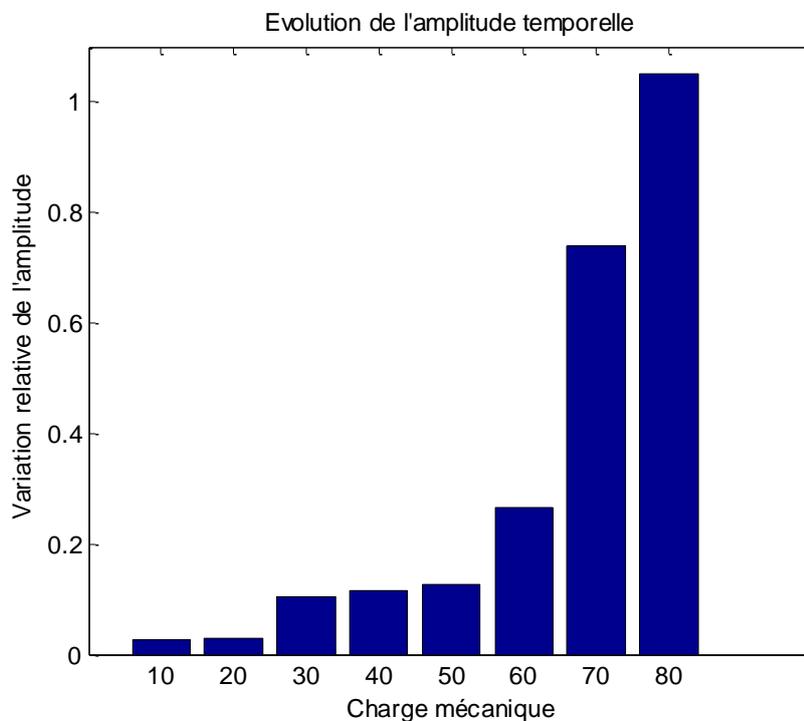


figure III-22 : Evolution de l'amplitude temporelle en fonction du chargement mécanique

Les trois derniers blocs de chargement mécanique ont pour conséquence une amplitude relative croissante et nettement plus importante que dans les cas précédents (au moins 0.25 pour chaque chargement) allant jusqu'à une perte d'amplitude relative proche de 1 correspondant à une quasi-extinction de l'onde reçue, comparativement à celle du premier chargement.

Ce paramètre permet l'identification d'un seuil d'endommagement précédemment identifiés (à 60% de charge à rupture). Il est néanmoins beaucoup plus sensible au dépassement de la limite d'endurance estimée par la courbe de Wöhler à 60% UTS qu'au seuil d'endommagement critique à 40% de la charge maximale du matériau.

L'obtention de résultats globaux est une limite pour l'utilisation de cette technique dans la perspective de fusion de données. En effet, les résultats n'étant pas disponibles sous forme d'images, ils ne sont pas homogènes avec les autres cartographies présentées dans ce chapitre.

### **III.7. Conclusion**

Le chapitre III a été consacré à la mise en œuvre de 6 méthodes de contrôle non destructif : thermographie infrarouge, corrélation d'images numériques, acousto-ultrasons, émission acoustique, ultrasons en mode C-scan et mode de Lamb. Chacune a permis d'atteindre l'objectif de caractérisation de l'endommagement du matériau.

La thermographie infrarouge a été pratiquée sous forme passive pour caractériser l'endommagement du matériau lors de l'essai d'auto-échauffement. Une nouvelle méthode d'analyse des données basée sur une fonction de régression numérique a été appliquée aux données expérimentales. L'étude des paramètres obtenus permet de réaliser le suivi thermique du composite dans le domaine transitoire et permanent. De plus, les effets thermoélastiques cycliques induits par la fatigue ont également été pris en compte. Il est alors possible de réaliser le suivi global (à l'échelle de l'éprouvette) du matériau et de localiser les zones les plus endommagées.

La corrélation d'images numériques a été mise en œuvre simultanément à la thermographie infrarouge. Les données de chaque bloc de fatigue ont alors été partitionnées afin d'obtenir des paramètres autorisant le suivi continu de la dégradation du composite. Dans un premier temps, l'aire de l'hystérésis (correspondant à l'énergie de déformation dissipée par le matériau) a été analysée. A l'aide d'un traitement de données innovant, un seuil d'endommagement critique du composite a été identifié, corroborant les résultats de thermographie infrarouge. Dans un second temps, l'aire de l'hystérésis et les champs de

déformations ont été utilisés afin de caractériser les différents comportements mécaniques du matériau et de localiser les zones à forte concentration de déformations.

Les acousto-ultrasons ont fait l'objet d'un développement inédit dans le cadre de cette thèse. Il repose sur l'acquisition d'ondes acousto-ultrasonores artificielles générées à l'aide de cassés de mines de crayons sur un maillage de la zone d'étude. Cette technique est appliquée hors contrainte et nécessite des traitements complémentaires (interpolation linéaire, fusion de données et définition de paramètres d'endommagement) afin de caractériser efficacement l'endommagement mécanique d'un bloc de fatigue à un autre. Les deux paramètres définis (variation d'amplitude et de fréquence d'initiation) permettent alors le suivi de l'endommagement du composite et la caractérisation des zones les plus dégradées de l'éprouvette.

Les émissions acoustiques ont aussi été appliquées dans le but d'évaluer en continu l'endommagement du matériau. Cependant, l'impossibilité de comparer spatialement ces données avec les autres techniques (thermographie et corrélation d'images numériques) a conduit à un développement inédit, à savoir la proposition d'une nouvelle méthodologie qui permet la localisation des ondes acoustiques à l'aide de deux capteurs seulement. Cette méthode est basée sur l'exploitation des données enregistrées avec les acousto-ultrasons par des réseaux de neurones qui fournissent une estimation de la position de la source acoustique recherchée avec une précision connue. L'analyse de ces cartographies permet alors de réaliser le suivi de l'endommagement du composite ainsi que la localisation des zones les plus dégradées. La caractérisation globale de l'endommagement est également réalisée à l'aide de paramètres d'émission acoustique plus classiques comme l'amplitude des événements acoustiques.

Enfin, les méthodes ultrasonores ont été appliquées afin d'évaluer l'évolution de l'amplitude temporelle et la vitesse dans l'épaisseur du matériau dans un état hors contrainte mécanique. La variation d'amplitude a été utilisée pour caractériser l'endommagement. La vitesse dans l'épaisseur est affectée par la dégradation du matériau lorsque l'ensemble du matériau est fortement dégradé, rendant ce paramètre moins efficace pour l'évaluation de l'état de santé du composite durant les premiers blocs de chargements. Les ondes de Lamb, quant à elles, ont été appliquées avant et après chaque chargement mécanique. La variation

relative d'amplitude temporelle a permis d'identifier les différents seuils d'endommagement du matériau.

Les résultats issus de chaque technique sont présentés dans leur majorité sous forme de cartographies établies durant toute la vie du matériau étudié. Ces images permettent de caractériser visuellement les zones les plus endommagées. Ainsi, il est plus facile pour un opérateur d'émettre un diagnostic sur l'état de santé du composite. De plus, cette présentation s'avère favorable, voire impérative, pour la réalisation d'une fusion de données basée sur les méthodes d'apprentissage, objet du chapitre suivant.

## **IV. Fusion de données et pronostic de la durée de vie résiduelle**

Dans le chapitre IV, les données issues des techniques de contrôle non destructif mises en œuvre sont fusionnées pour évaluer l'endommagement et pronostiquer la durée de vie résiduelle du matériau. Une comparaison entre les méthodes mathématiques et d'apprentissage conduit à valider l'approche basée sur les réseaux de neurones, permettant le monitoring de l'endommagement et la localisation des zones endommagées du matériau durant toute sa vie. La nécessité d'une quantité de données importante pour réaliser un entraînement efficace est contournée en utilisant des cartographies à l'échelle du pixel.

Les réseaux de neurones sont appliqués sur les indicateurs présentés au chapitre III pour chaque technique de contrôle non destructif. Ce type de fusion permet d'évaluer la sensibilité à l'endommagement de chaque technique.

Plusieurs niveaux de fusion de données sont praticables. Une fusion de niveau intermédiaire peut être réalisée directement avec tous les indicateurs en une seule étape. La fusion de haut niveau est, quant à elle, réalisée en deux étapes avec une première fusion des paramètres intrinsèques de chaque technique de contrôle non destructif, puis une seconde fusion des indicateurs déterminés à partir de la première fusion.

Les résultats obtenus à l'aide des réseaux de neurones permettent alors l'évaluation de la durée de vie résiduelle du matériau avec la courbe de Wöhler, les cartographies du nombre de cycles résiduels indiquent également les zones de ruine du matériau les plus probables.

Enfin, on s'attachera à évaluer les capacités d'extrapolation des réseaux de neurones. Parvenir à prédire l'état de santé de la structure et anticiper sa ruine mécanique future permettra de gérer au mieux la maintenance et la sécurité des structures étudiées.

## **IV.1. Comparaison des méthodes de fusion**

La fusion de données permet de regrouper les résultats de plusieurs techniques de contrôle non destructif en un seul résultat synthétique prenant en compte leurs redondances, complémentarités et conflits.

Certaines théories mathématiques prennent en compte la plupart de ces aspects (Dempster-Shafer, théorie des possibilités, ...), d'autres utilisent des analyses plus globales avec un

apprentissage sur l'ensemble des données enregistrées (réseaux de neurones, machine à support de vecteurs, outils de classification et de régression).

Pour évaluer leur efficacité, une comparaison est présentée sur la base des résultats de thermographie pour les quatre paramètres ( $T_f$ ,  $T_1$ ,  $\varphi_1$ ,  $T_2$ ) précédemment explicités au chapitre III.

#### IV.1.1. Cas d'étude

Pour comparer les méthodes de fusion, il est nécessaire d'introduire des indicateurs d'endommagement adimensionnels définis sur une échelle normée (entre 0 et 1) au lieu d'utiliser des paramètres physiques bruts. Ainsi, pour chaque paramètre  $P$ , on introduit le paramètre  $P_{normé}$  défini par l'équation (IV.1). Ces nouveaux paramètres normés, adimensionnels peuvent alors être utilisés pour la fusion.

$$P_{normé} = \frac{P - P_{mini}}{P_{maxi} - P_{mini}} \quad (IV.1)$$

où  $P_{mini}$  et  $P_{maxi}$  sont les valeurs minimales et maximales du paramètre  $P$  sur l'ensemble des distributions (images) à fusionner.

Dans la littérature, plusieurs opérateurs de fusion de données portant sur d'autres paramètres de thermographie infrarouge et de courant de Foucault ont déjà été comparés [178].

La comparaison est réalisée sur trois blocs de fatigue : 40%, 60% et 80% UTS. Les cartographies des paramètres de régression ( $T_f$ ,  $T_1$ ,  $\varphi_1$ ,  $T_2$ ) sont utilisées comme support de fusion. Trois méthodes de fusion sont retenus : opérateur maximum, théorie de Dempster-Shafer et réseaux de neurones.

Les cartographies de fusion sont présentées avec une échelle normalisée (évaluation de l'endommagement entre 0 et 1) permettant l'identification des zones les plus endommagées.

#### IV.1.2. Opérateur maximum

Une stratégie peut être de préserver la valeur maximale des paramètres à fusionner. Cette méthode a déjà été appliquée dans le cas des acousto-ultrasons au chapitre III. L'application

de cet opérateur sur les trois chargements mécaniques permet un suivi de l'endommagement du composite (figure IV-1).

Pour le chargement à 40% UTS, la distribution du résultat de fusion présente peu de disparités (moyenne de l'ordre 0.7 avec des valeurs comprises entre 0.6 et 0.8). La cartographie est similaire à celles obtenues avec celles des paramètres fusionnés ( $T_f$ ,  $T_1$ ,  $\varphi_1$ ,  $T_2$  au chapitre III.1).

Le bloc de fatigue à 60% UTS fait apparaître un endommagement plus significatif. Effets d'échelle mis à part, cette cartographie est similaire à celle obtenue avec le paramètre  $T_1$ . Cet opérateur ne prend pas en compte les deux zones apparaissant comme endommagées avec la phase angulaire  $\varphi_1$  (figure III-3), ou celles des cartographies de  $T_1$  (figure III-2) et présente une limitation importante lors d'un cas de conflit entre deux paramètres à fusionner.

Lors du chargement à 80% UTS, la charge mécanique plus sévère devrait induire une propagation de l'endommagement à l'ensemble de la zone d'étude. Malheureusement, la zone identifiée ici comme étant la plus endommagée est la partie supérieure du matériau (de 0 à 40mm), alors que la rupture est apparue au centre de la zone d'étude (60 à 100mm de longueur). Avec cet opérateur de fusion, les capacités d'évaluation de l'endommagement lors de chargements mécaniques sévères sont donc décevantes.

En somme, l'opérateur maximum ne permet une évaluation de l'endommagement satisfaisante que dans le cas où les informations sont redondantes (40% UTS). Dans le cas d'une situation de conflit, à 60% UTS, un seul paramètre est utilisé pour réaliser la fusion alors que rien n'indique qu'il soit plus pertinent qu'un autre. Cela peut même conduire à des erreurs de localisation de la zone endommagée (image à 80% UTS).

L'intérêt d'une méthodologie « simple » de fusion de données apparaît donc limité. Aussi, d'autres théories ont été développées.

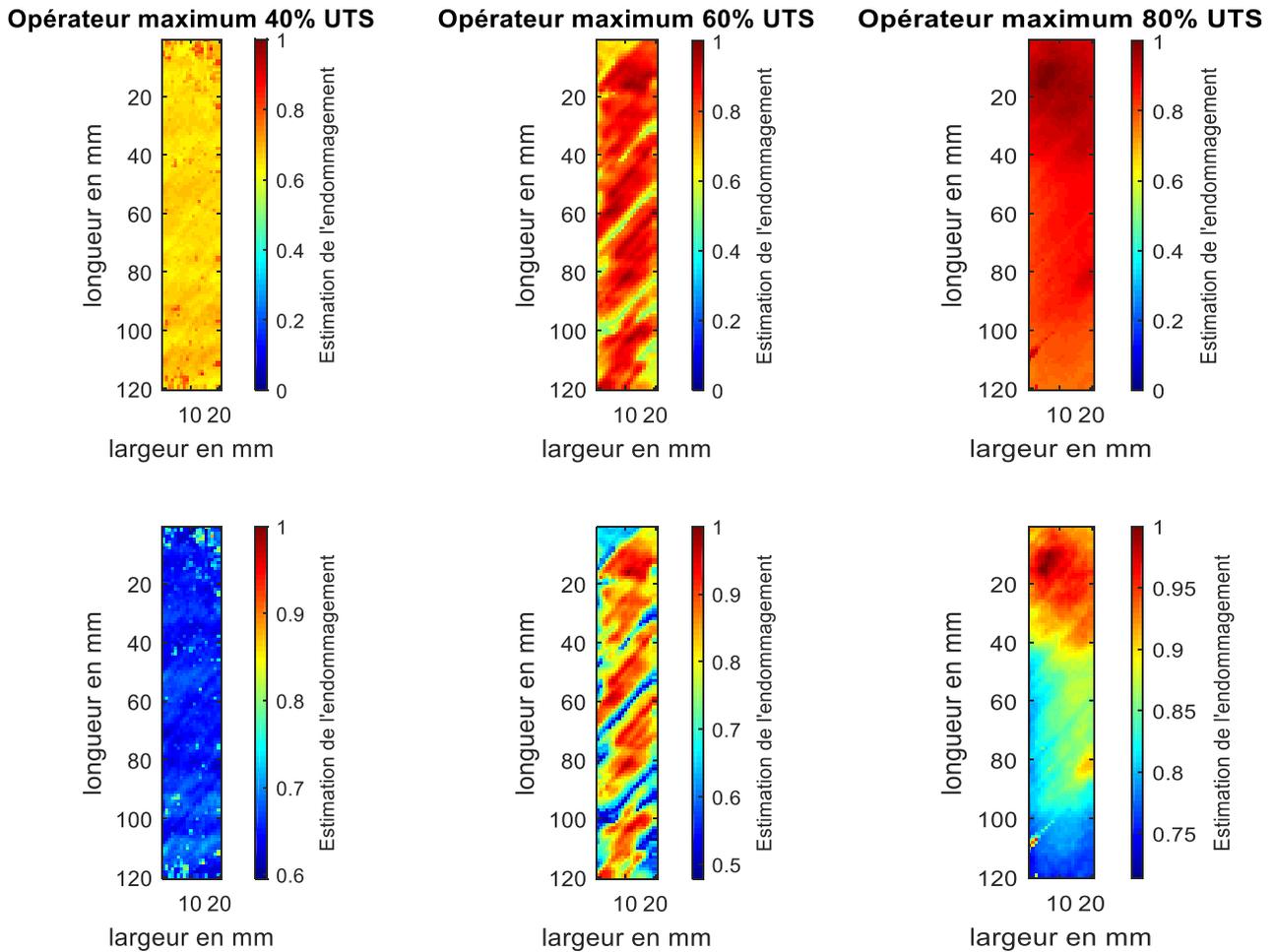


figure IV-1 : Fusion de données via opérateur maximum pour différents niveaux de chargement mécanique (en % UTS)

### IV.1.3. Dempster-Shafer

La fusion des images via la théorie de Dempster-Shafer requiert une définition précise des masses de croyances. Il est possible de les déterminer à l'aide de l'histogramme en nuances de gris des images à fusionner [184] (figure IV-2).

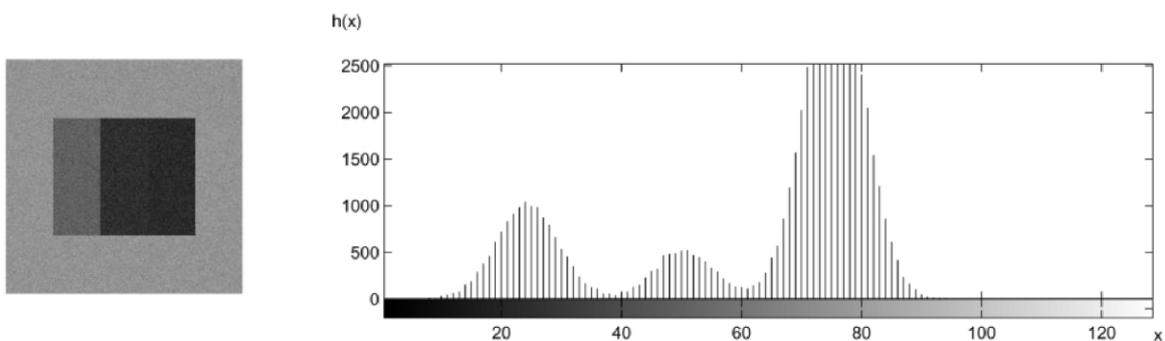
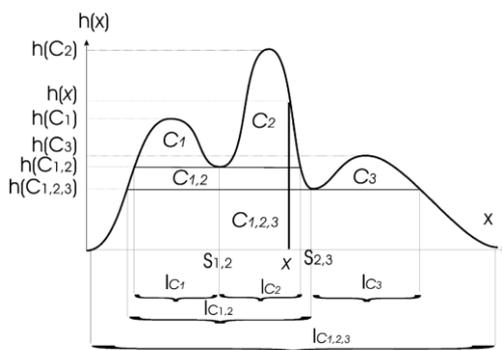


figure IV-2 : Nuancier et distribution en nuance de gris pour la définition des masses de croyances (adapté de [184])

Pour ce faire, la fonction  $h$  est définie à partir de l'histogramme en nuances de gris de l'image. Elle fait correspondre une valeur de nuances de gris (par exemple gris clair soit  $x=80$ ) au nombre de pixels associés à cette teinte dans l'image considérée ( $h(80)=2000$  dans cet exemple). Trois classes ( $C_1, C_2, C_3$ ) sont définies à partir des minima locaux de l'histogramme. La définition des classes, leurs intervalles de calcul ainsi que la détermination des masses sont présentés sur la figure IV-3. Les minima locaux de cette fonction sont utilisés afin de délimiter les zones de transitions entre deux classes  $C_i$  et  $C_j$ , et identifiés par l'extremum local  $h(C_{i,j})$ . Il est alors possible de définir la classe  $C_{i,j}$  correspondant à  $C_i \cup C_j$  et les masses de croyances  $m_x$  associées.



$$m_x(A_1^x = C_2) = K_x \cdot (h(x) - h(C_{1,2}))/h(x) \quad (IV.2)$$

$$m_x(A_2^x = C_{1,2}) = (h(C_{1,2}) - h(C_{1,2,3}))/h(x) \quad (IV.3)$$

$$m_x(A_3^x = C_{1,2,3}) = h(C_{1,2,3})/h(x) \quad (IV.4)$$

figure IV-3 : Définition et calcul des masses de croyances à partir des niveaux de gris  
(adapté de [184])

Les quatre paramètres de régression de thermographie ( $T_f, T_1, \varphi_1, T_2$ ) ont été normés pour la fusion par opérateur maximum. Cette normalisation impose à ces paramètres d'entrées de la fusion une évolution réduite entre 0 et 1 à l'instar des distributions en nuances de gris (entre 0 et 256). Les données support à la fusion sont utilisées de la même manière et permettent la définition de 10 classes sur le chargement mécanique pour 40% UTS, de 14 classes pour 60% UTS et de 8 classes pour 80% UTS (figure IV-4). Le nombre de classes n'est pas identique d'un chargement à l'autre étant donné que les distributions ne présentent pas le même nombre de minima locaux. Les résultats de cette fusion sont illustrés sur la figure IV-5.



figure IV-4 : Définition des classes avec Dempster-Shafer

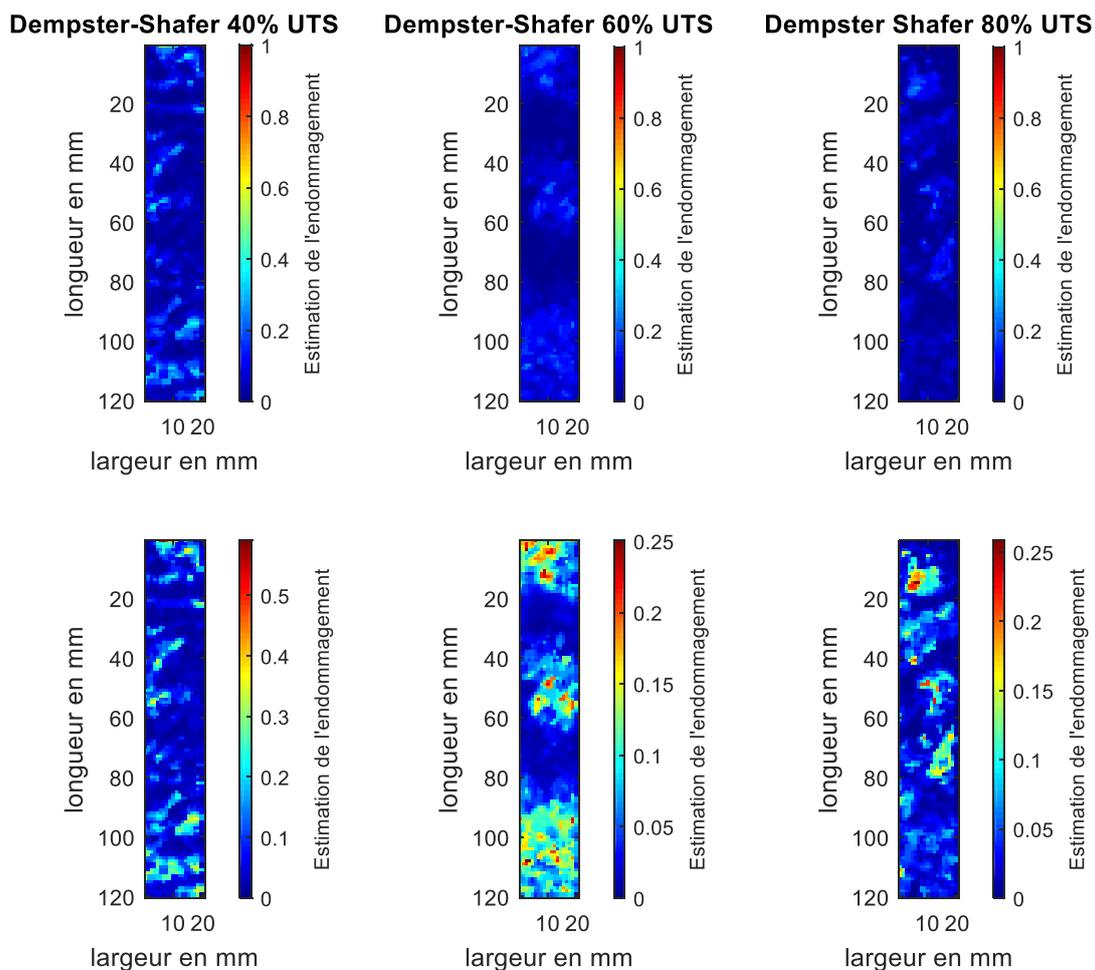


figure IV-5 : Fusion de données de Dempster-Shafer avec filtre médian pour différents niveaux de chargement mécanique (en % UTS)

Les résultats obtenus ne sont pas représentatifs de la dégradation réellement induite dans le composite. Les cartographies indiquent même une propagation de l'endommagement incohérente, contraire celle caractérisée expérimentalement (endommagement décroissant avec la charge mécanique). De plus, la localisation des foyers d'endommagement est aussi limitée et sans lien avec différents paramètres de la fusion. Cette méthode de fusion de

données apparaît donc inappropriée au regard des objectifs poursuivis et sera abandonnée pour la suite des travaux.

#### **IV.1.4. Réseaux de neurones**

Les données de trois blocs de fatigue sont utilisées afin d'entraîner un réseau de neurone à l'échelle du pixel. Les trois cartographies contiennent  $120*20*3=7200$  points. Ceci est plus que suffisant pour achever l'entraînement d'un réseau de qualité.

Une valeur de sortie (solution au problème posé) étant requise lors de l'apprentissage des réseaux de neurones, la valeur numérique du chargement mécanique est utilisée (0.4 pour 40% UTS, 0.6 pour 60% UTS et 0.8 pour 80% UTS).

Une fois le réseau de neurone entraîné, il est possible de vérifier l'évaluation du réseau sur la même éprouvette que celle utilisée pour les autres fusions. Du point de vue des réseaux de neurones, ces données sont complètement inconnues (figure IV-6), l'apprentissage ayant été réalisé avec une seconde éprouvette.

Le suivi continu (d'un chargement à l'autre) est mené à bien, permettant une identification rapide de l'état d'endommagement du composite. Les variations au sein des distributions présentées permettent également la localisation de l'endommagement avec l'utilisation d'une échelle plus fine.

La méthode de fusion par réseaux de neurones apparaît donc comme la plus fiable et efficace. De plus, ces résultats étant obtenus pour des données différentes de celles de l'entraînement, cette méthode est plus robuste que les précédentes.

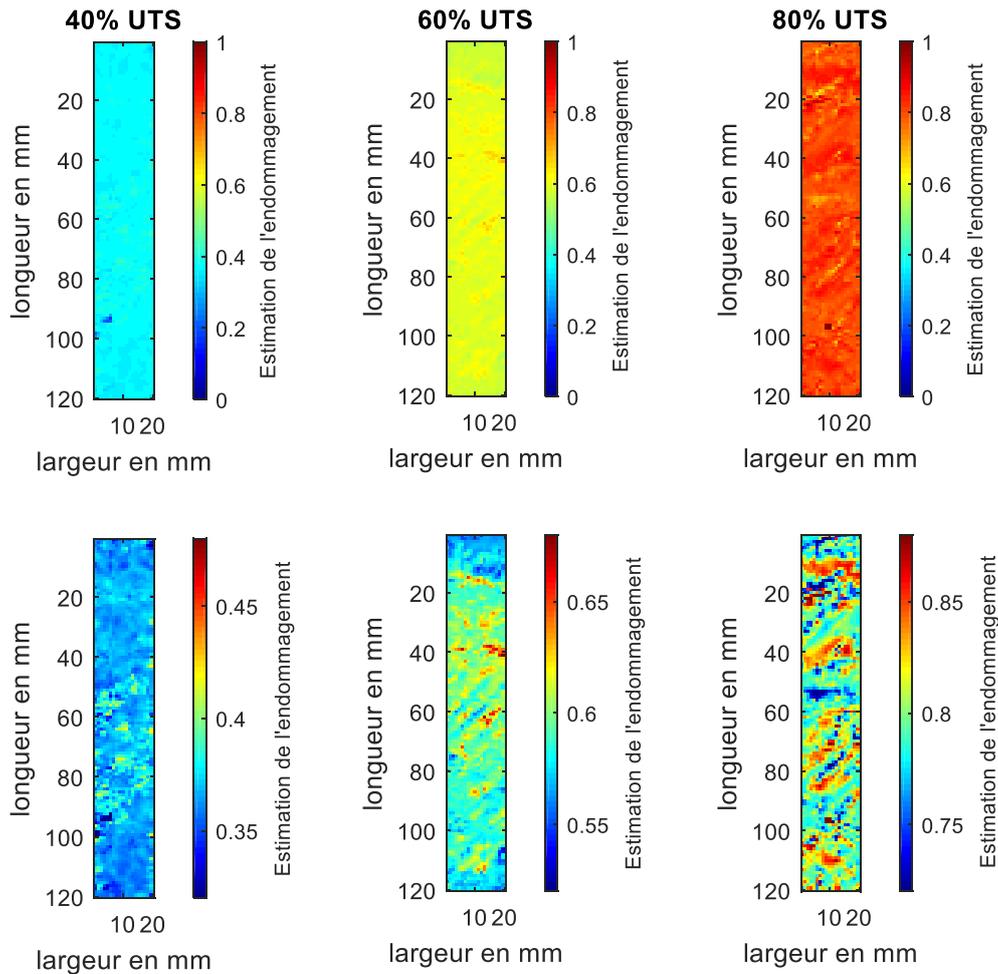


figure IV-6 : Fusion de données par réseaux de neurones pour différents niveaux de chargement mécanique (en %UTS) pour une éprouvette inconnue du réseau

#### IV.1.5. Bilan

Le Tableau IV-1 récapitule les résultats des différentes méthodes de fusion appliquées en termes de capacités de suivi et de localisation de l'endommagement.

Tableau IV-1 : Récapitulatif des différentes fusions

Type de fusion	Identification des zones endommagées d'un chargement à l'autre	Suivi de l'endommagement d'un chargement à l'autre
Paramètre maximum	Non	Oui
Dempster Shafer	Non	Non
Réseaux de neurones	Oui	Oui

A l'issue de cette analyse, il apparait que les réseaux de neurones sont à privilégier pour obtenir une fusion de données complète permettant un suivi continu et une localisation des

foyers de l'endommagement du matériau. Cependant, elle nécessite l'utilisation d'une grande quantité de données pour l'apprentissage des réseaux.

## **IV.2. Fusion de données homogènes issues de techniques de contrôle non destructif**

La méthodologie des réseaux de neurones a été appliquée aux données de thermographie infrarouge, de corrélation d'images numériques et aux acousto-ultrasons. Les cartographies présentées sont les résultats obtenus sur la même éprouvette celle ayant servi à la caractérisation expérimentale (chapitre III). Du point de vue des réseaux, ces données expérimentales sont complètement inconnues et n'ont jamais servi à leurs entraînements et validations (apprentissage sur une autre éprouvette).

### **IV.2.1. Méthode**

La mise en place de cartographies à l'échelle millimétrique permet l'obtention de suffisamment de données nécessaires à la réalisation des analyses par réseaux de neurones. Ainsi, avec un seul bloc de fatigue au moins  $120 \times 20 = 2400$  points sont obtenus pour chaque paramètre dans le cas d'une analyse ex-situ et  $120 \times 20 \times 18 = 43200$  points lors d'un suivi continu. **Les données à l'échelle du  $\text{mm}^2$  sont alors utilisées pour l'entraînement du réseau.**

Le but de la méthode est de réaliser un apprentissage des neurones artificiels pour qu'ils génèrent une relation mathématique entre les entrées du réseau et la sortie donnée par l'opérateur. La structure classique d'un réseau de neurones a déjà été rappelée au chapitre I (figure I-24). Les phases d'entraînements, notamment l'attribution des poids, sont répétées par l'algorithme d'apprentissage jusqu'à réduire l'erreur du réseau. Cet entraînement est réalisé sur tous les neurones de toutes les couches (neurones d'entrés, couche(s) de neurones intermédiaire(s) et neurone de sortie).

**La sortie du réseau correspond aux chargements mécaniques appliqués à l'éprouvette.** Etant donné les essais réalisés, le réseau est entraîné avec des valeurs de sorties allant de 0% si une caractérisation initiale est disponible (10% de charge à rupture sinon) jusqu'à 80% UTS. L'obtention d'un résultat tangible, tel que la charge mécanique appliquée, est nécessaire pour l'estimation de la durée de vie résiduelle. Définir ainsi la sortie des réseaux

permet l'obtention d'une échelle connue plutôt qu'un indicateur arbitraire entre 0 et 1. Les différentes phases de validation du réseau sont schématisées sur la figure IV-7.

Contrairement aux précédentes, **cette méthode de fusion ne nécessite pas de normalisation des paramètres d'entrées**. Les valeurs des paramètres sont utilisées telles qu'obtenues au chapitre III les unités associées.

Afin que l'apprentissage soit le plus précis possible, la sortie du réseau est calculée pour les différents niveaux de chargements. Pour ce faire, 8000 mm<sup>2</sup> de données réparties aléatoirement dans la longueur, la largeur et les chargements mécaniques de l'éprouvette servent de support à l'entraînement.

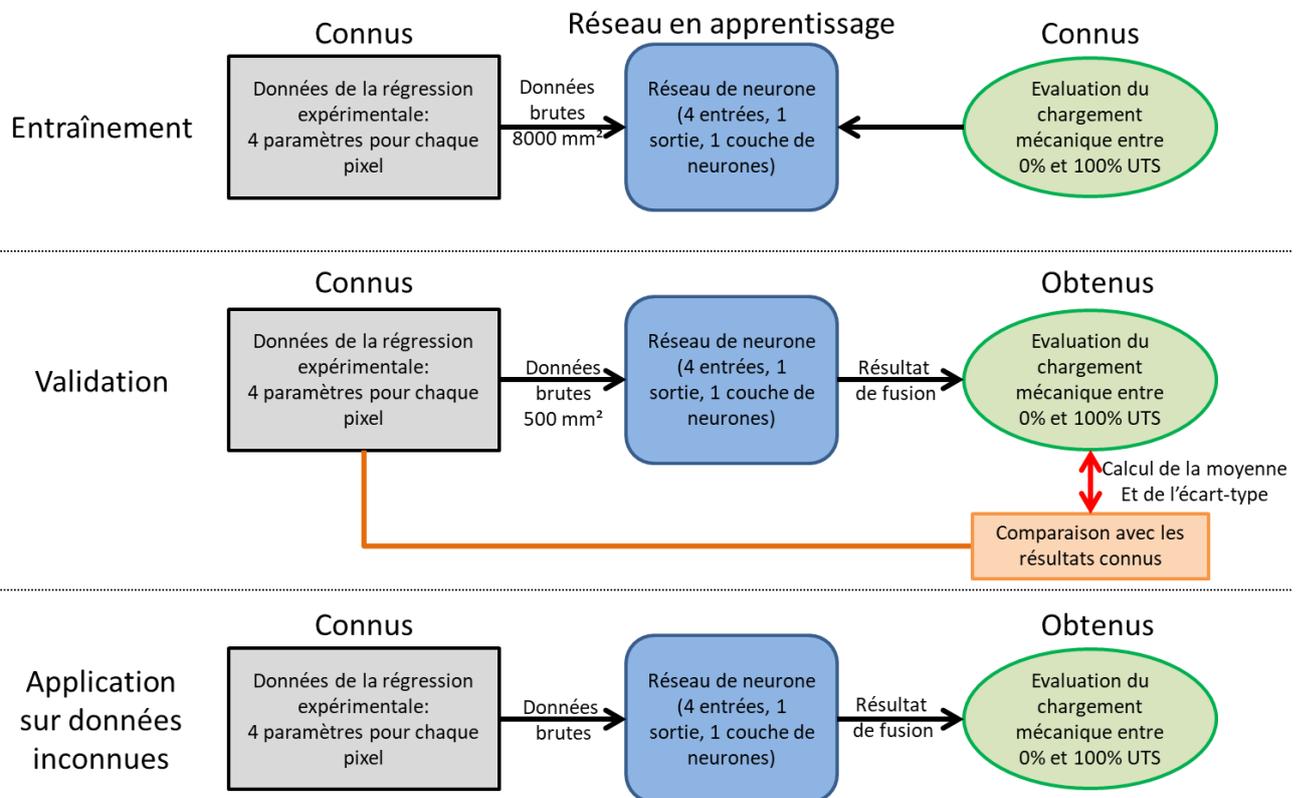


figure IV-7 : Génération d'un réseau de neurones en thermographie infrarouge

La validité du réseau obtenu est évaluée en termes de précision après la phase d'apprentissage. A cette fin, 500 nouveaux pixels choisis aléatoirement sont soumis à l'évaluation du réseau. La sortie est alors comparée avec les résultats de chargements mécaniques connus au niveau de ces pixels. Une erreur moyenne et l'écart-type associé en sont déduits (équations IV.5 et IV.6).

$$erreur = \frac{\sum_{i=1}^{500} |\%UTS_{estimé\ des\ réseaux}(i) - \%UTS_{réellement\ appliqué}(i)|}{500} \text{ en \%UTS} \quad (IV.5)$$

$$ecart\_type = \sqrt{\sum_{i=1}^{500} (\%UTS_{estimé\ des\ réseaux}(i) - erreur)^2} \text{ en \%} \quad (IV.6)$$

Cette méthode d'analyse étant non-déterministe, il convient de multiplier les entraînements afin de ne conserver que les réseaux présentant une précision élevée. **Les trois réseaux présentant l'erreur la plus faible sont alors utilisés afin de réaliser un vote sur l'estimation de la charge mécanique du composite.** Lorsque ces deux étapes sont validées, de nouvelles données inconnues des réseaux sont appliquées en entrée.

### IV.2.2. Thermographie infrarouge

Les données de la régression de thermographie passive ont été utilisées comme support à la comparaison avec les autres méthodes de fusion de données. La méthode précédente est appliquée aux données de la régression ( $T_f$ ,  $T_1$ ,  $\varphi_1$ ,  $T_2$ ) sur les huit chargements mécaniques (figure IV-8). L'erreur moyenne et l'écart-type associés sont estimés respectivement à  $\pm 1.9\%$  et  $1\%$  de charge à rupture.

Chaque cartographie présente une distribution homogène peu dispersée autour de la valeur du chargement mécanique appliquée. Ceci permet une distinction nette entre les premiers niveaux de chargements (10% UTS à 40% UTS). Les disparités au sein des cartographies de fusions permettent également d'identifier les zones les moins et les plus endommagées du composite.

Ce premier résultat prouve l'intérêt d'utiliser plusieurs paramètres pour caractériser l'état de santé du matériau. En effet, exploité seul, aucun des paramètres de la thermographie infrarouge passive ne permet à la fois la localisation et l'évaluation en continu de la charge mécanique.

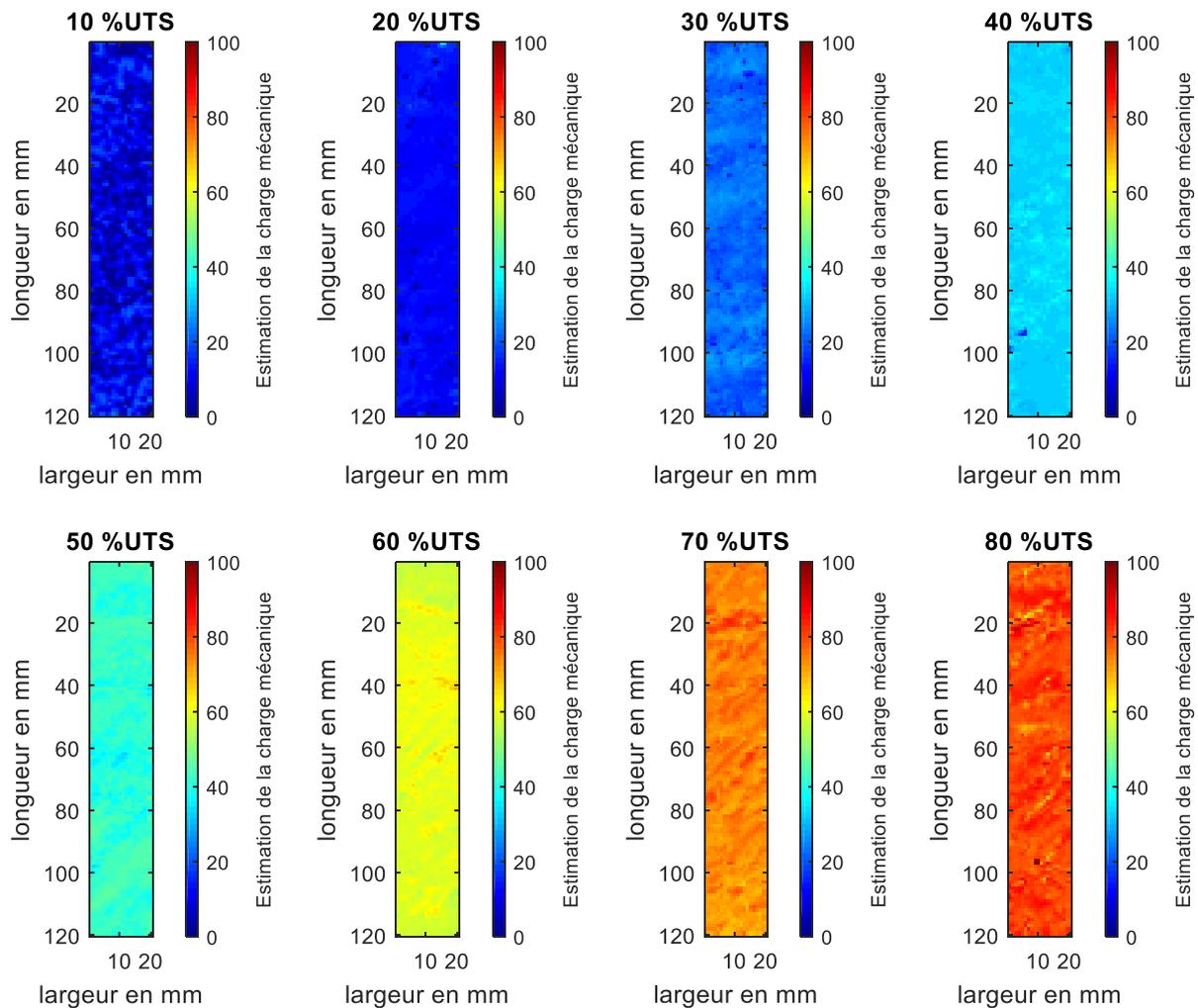


figure IV-8 : Fusion des indicateurs de thermographie passive en régression

### IV.2.3. Corrélation d'images numériques

La fusion de données est aussi mise en oeuvre sur les résultats de corrélation d'images numériques de l'essai d'auto-échauffement avec les paramètres de l'aire de l'hystérésis, des deux déformations principales et des déformations transverses (figure IV-9). La même méthodologie de réseaux de neurones est appliquée. La précision du résultat est satisfaisante, avec une erreur de l'ordre de  $\pm 2\%$  et un écart-type de 2.4% de la charge à rupture.

La fusion des paramètres de corrélation d'images numériques permet l'identification du seuil d'endommagement critique à 40% UTS avec l'apparition des premières hétérogénéités au sein de la distribution des chargements mécaniques (forte hétérogénéité de la distribution allant de 40% à 50% UTS). Cependant, la différenciation des blocs de fatigue à

10% UTS et 20% UTS est moins visible que dans le cas de la thermographie infrarouge. Pour les autres cartographies, les disparités, intra- et inter-chargements, évaluées par les réseaux de neurones sont plus importantes, allant jusqu'à 40% d'amplitude pour les blocs réalisés à 70% et 80% UTS. Ainsi, les zones endommagées sont plus facilement identifiables.

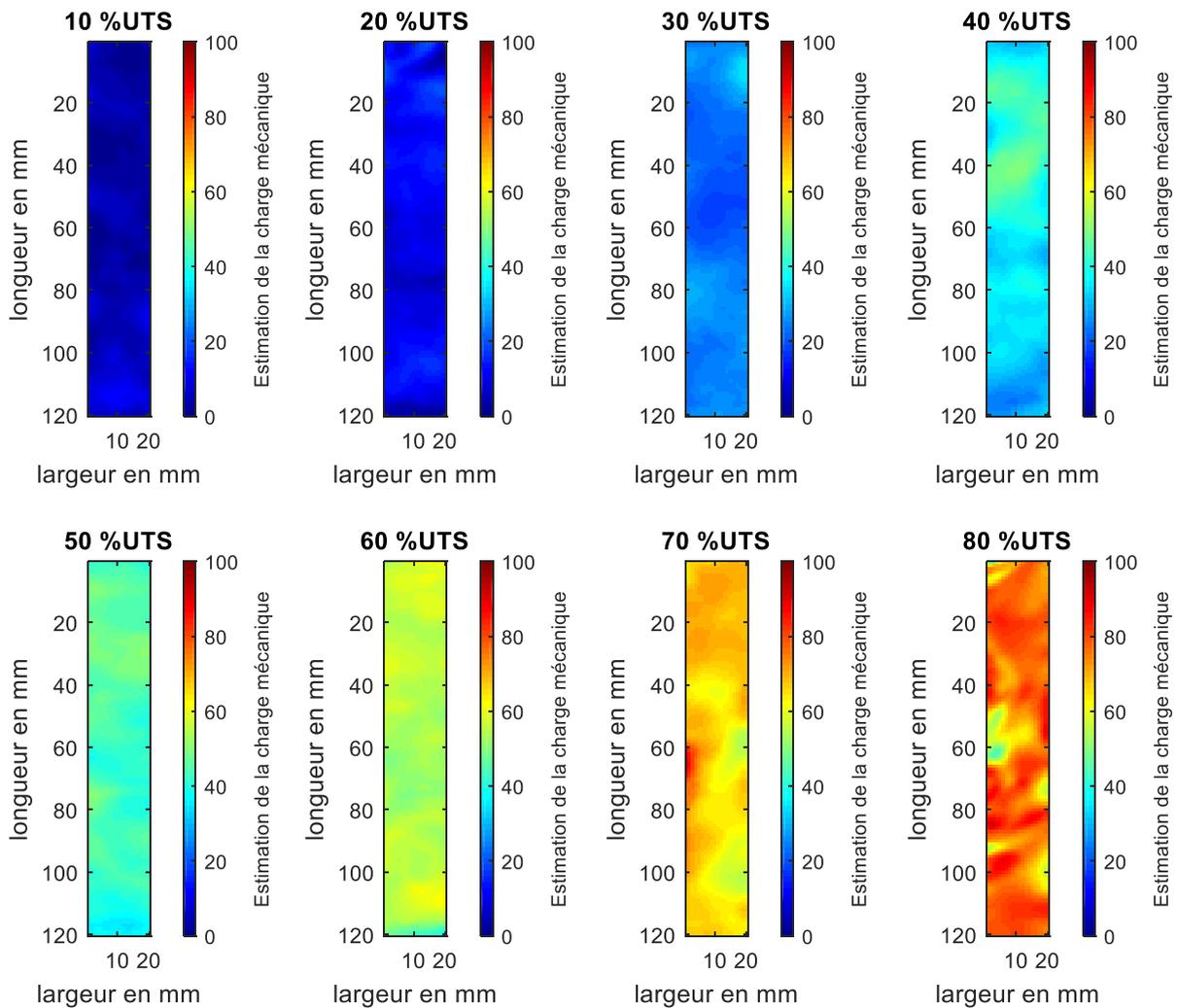


figure IV-9 : Fusion des indicateurs de corrélation d'images numériques

#### IV.2.4. Acousto-ultrasons

Dans le cas des acousto-ultrasons, deux paramètres (variation d'amplitude et de fréquence d'initiation) sont utilisés pour l'entraînement des réseaux de neurones. Les cartographies fusionnées sont présentées à la figure IV-10.

La moyenne de l'erreur estimée par le réseau est de l'ordre de  $\pm 2.6\%$  avec un écart-type de 3.2%. Ce niveau de précision est acceptable pour l'évaluation de la charge mécanique, même

s'il est plus élevé que ceux obtenus en thermographie ou en corrélation d'images numériques. Cette légère dégradation est due à l'utilisation de seulement deux paramètres pour réaliser la fusion de données.

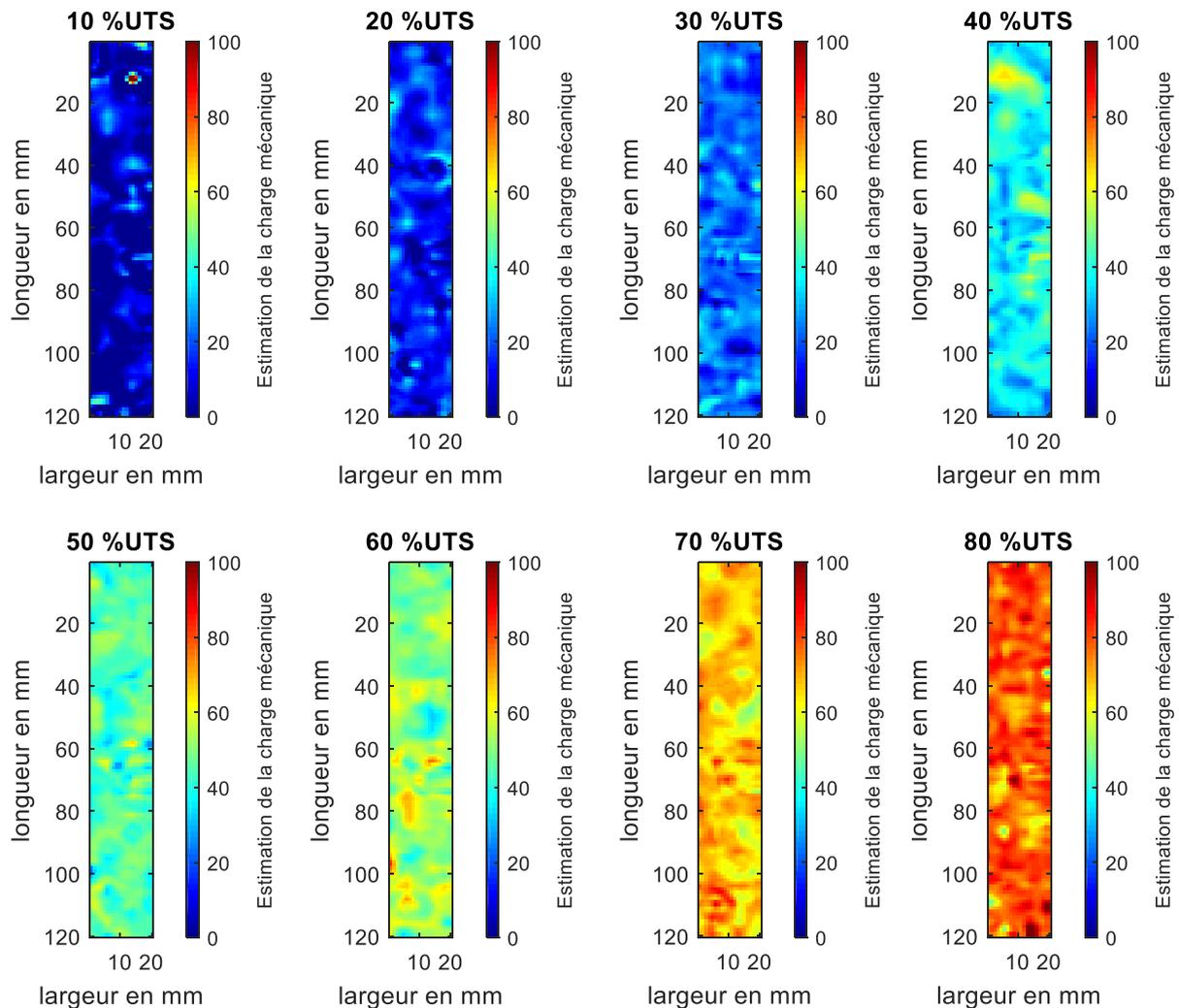


figure IV-10 : Fusion des indicateurs d'acousto-ultrasons

Les cartographies obtenues montrent que les différents niveaux de chargements mécaniques sont identifiables, y compris les plus faibles. Au-delà de 40% de la charge à rupture, elles font apparaître un niveau d'endommagement plus important que celui obtenu avec chacun des paramètres considérés individuellement (cf chapitre III.3).

Le réseau de neurone évalue ainsi l'augmentation de charge mécanique appliquée lors des blocs de fatigue allant de 50% à 80% UTS mais avec une tendance à la surévaluation (présence d'un biais de quelques % UTS). Appliqué à des structures réelles, ce

comportement peut s'avérer problématique avec une anticipation du remplacement de pièces mécaniques.

#### **IV.2.5. Bilan**

La méthode de fusion de données basée sur les réseaux de neurones a été appliquée sur la thermographie infrarouge passive, la corrélation d'images numériques et les acousto-ultrasons, techniques dotées chacune de plusieurs indicateurs d'endommagement. Cette méthode a permis un diagnostic précis de l'état de santé du composite via la prédiction du chargement mécanique qui lui a été appliqué (erreur d'estimation inférieure à  $\pm 3\%$ ). Après cette première application de fusion de données homogènes (fusion d'indicateurs issus d'une même technique de contrôle non destructif), le cas d'indicateurs hétérogènes appartenant à différentes techniques est considéré.

### **IV.3. Fusion de données hétérogènes issues de techniques de contrôle non destructif**

Plusieurs stratégies peuvent être développées avec cette méthodologie de fusion avec les fusions de bas, moyen et haut niveau (chapitre I).

#### **IV.3.1. Fusion de haut niveau**

La fusion de haut niveau adoptée dans cette étude inclue deux étapes (figure IV-11) :

- La première étape, déjà réalisée, consiste en la fusion des paramètres propres à chaque technique de non destructif.
- La deuxième étape consiste, quant à elle, à réaliser une fusion de haut niveau « inter-techniques ». Ici, les résultats de la première étape sont fusionnés en leur ajoutant les cartographies du nombre d'évènements en émission acoustique et l'amplitude ultrasonore obtenue dans l'épaisseur du matériau. La prise en compte de l'ensemble des techniques permet un diagnostic plus complet : surfacique, volumique, sous contrainte (in-situ) ou hors de la machine de fatigue (ex-situ).

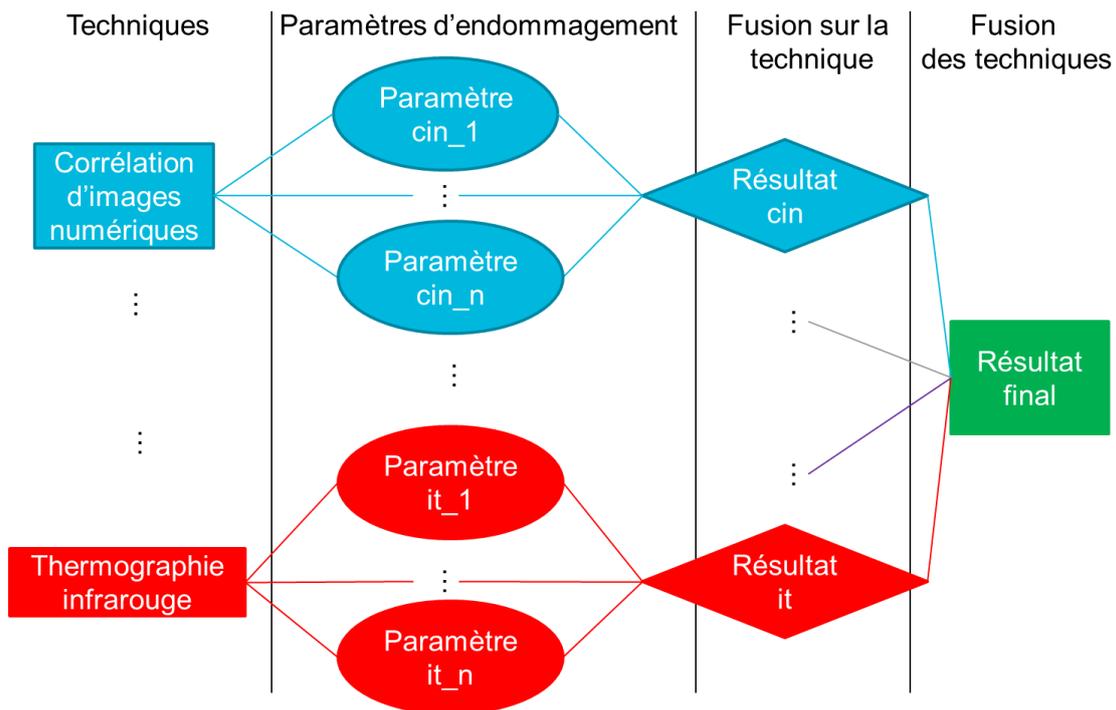


figure IV-11 : Schéma de la fusion de haut niveau

La figure IV-12 illustre les résultats de cette fusion de haut niveau obtenus pour tous les blocs de chargement (de 10% à 80% UTS).

Le réseau formé pour réaliser cette fusion présente l'erreur la plus faible de l'étude (0.6% avec un écart-type de 0.8%). La complémentarité des techniques de contrôle non destructif permet de réduire les erreurs d'estimation de la charge appliquée au composite par le réseau de neurones.

Les disparités visibles sur les cartographies correspondant à chaque bloc de fatigue permettent l'identification des zones potentiellement les plus sollicitées du matériau. Les effets surfaciques de l'empilement à 45°, visualisés par la thermographie infrarouge et la corrélation d'images numériques, sont identifiables. La localisation des événements acoustiques est particulièrement identifiables avec les tracés rectangulaires correspondant aux erreurs des réseaux de localisation. Ces cartographies du chargement mécanique sont alors une synthèse plus complète et plus précise de l'ensemble des résultats préalablement optimisés pour chaque technique de contrôle non destructif utilisée.

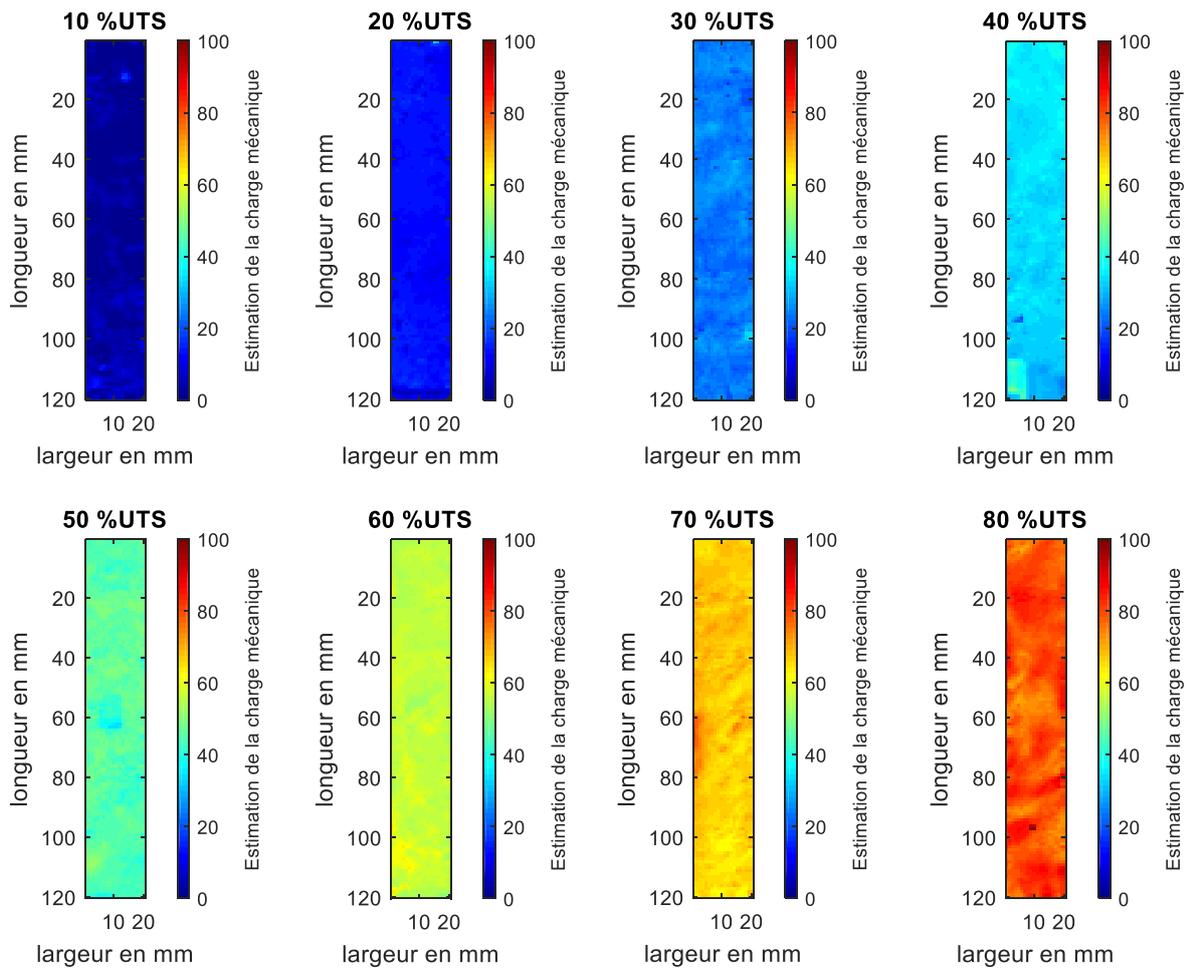


figure IV-12 : Cartographies de fusion de haut niveau pour chaque bloc de fatigue

### IV.3.2. Fusion de niveau intermédiaire

La fusion de niveau intermédiaire consiste à fusionner, en une seule étape, tous les paramètres indépendamment de la technique utilisée (figure IV-13). Cette méthode permet d'obtenir un seul résultat sans multiplier les étapes d'entraînements et de calculs. Cependant, elle n'autorise pas la comparaison des techniques entre elles.

La figure IV-14 présente le résultat de la fusion de niveau intermédiaire prenant en compte l'ensemble des indicateurs d'endommagement issus des différentes techniques utilisées. L'erreur moyenne obtenue est de l'ordre de de 0.9% avec un écart-type de 1.2% de la charge à rupture).

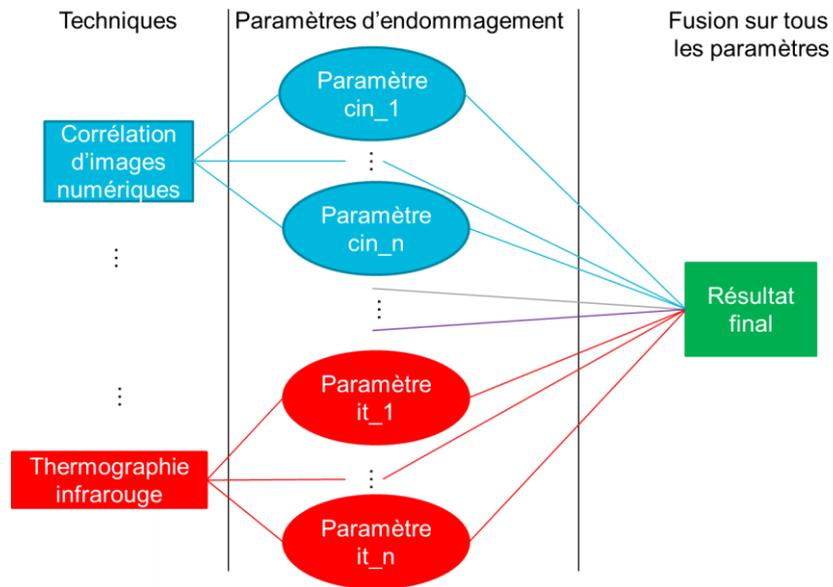


figure IV-13 : Schéma de la fusion de niveau intermédiaire

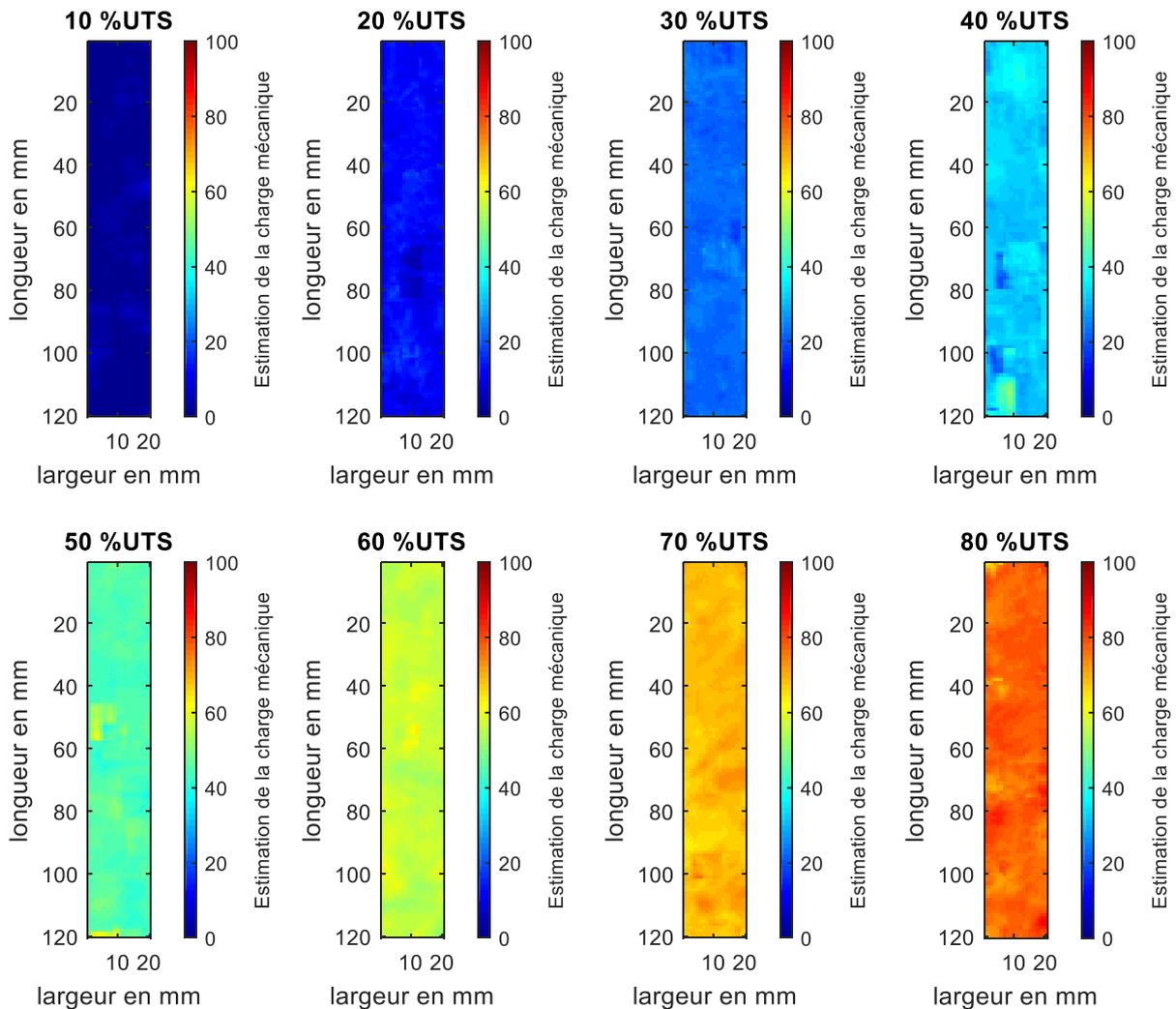


figure IV-14 : Fusion de l'ensemble des indicateurs multi-techniques

Tous les chargements mécaniques appliqués sont correctement prédits. Des disparités au sein des cartographies (potentiels foyers d'endommagement) de chaque bloc de chargement existent, mais elles sont moins prononcées que celles obtenues lors de la fusion de haut niveau. L'identification des zones endommagées est alors moins aisée dans ce cas, qu'avec la fusion de haut niveau.

### IV.3.3. Bilan

Le Tableau IV-2 récapitule les erreurs estimées sur les résultats des fusions intra- et inter-techniques. La fusion des paramètres de chaque technique permet une estimation précise de la charge mécanique appliquée au matériau (inférieure à 3%) comparée à une analyse classique paramètre par paramètre. Les fusions intermédiaires et de haut niveau, combinant les résultats des différentes techniques, sont encore plus précises. Les avantages de l'approche de fusion de données multi-techniques sont donc confirmés pour optimiser le diagnostic de l'état de santé des composites. Il reste maintenant à estimer la durée de vie résiduelle du matériau en se basant sur ces résultats et sur la courbe de Wöhler expérimentale.

Tableau IV-2 : Erreur moyenne et écarts-types des méthodes de fusions

Méthode de fusion		Erreur moyenne (en % UTS)	Ecart-type (en % UTS)
Intra-technique	Thermographie infrarouge	1.9	1.0
	Corrélation d'images numériques	2	2.4
	Acousto-ultrasons	2.6	3.2
Inter-technique	Fusion de haut niveau	0.6	0.8
	Fusion de niveau intermédiaire	0.9	1.2

## IV.4. Estimation de la durée de vie résiduelle

Afin d'estimer la durée de vie résiduelle du matériau, il est nécessaire d'établir une relation entre le chargement mécanique appliqué et le nombre de cycles résiduels de l'éprouvette [189, 192]. Cette fonction est déterminée par régression sur la courbe de Wöhler (équation IV.7).

$$Nb_{cycles\ résiduels} = 3 \cdot 10^{42} \cdot Charge_i^{-19.77} \quad (IV.7)$$

Comme expliqué précédemment, les réseaux de neurones permettent d'évaluer la valeur du chargement mécanique appliqué au matériau sur la base des de caractérisation non destructive. Ces valeurs de chargements prédites alimentent l'équation IV.7 pour estimer la durée de vie résiduelle du matériau.

La figure IV-15 illustre un exemple d'application de cette méthode d'estimation de la durée de vie résiduelle du matériau à l'échelle du pixel ( $1 \text{ mm}^2$ ). La valeur moyenne de la distribution du chargement mécanique appliqué, estimée par le réseau de neurones, est d'environ 60% UTS ; ceci correspond à une durée de vie résiduelle du matériau de l'ordre de  $10^{7.3}$  cycles avant la rupture, soit plus de 19 millions de cycles. Les zones les plus endommagées sont les plus susceptibles de conduire à une rupture prématurée (nombre de cycles résiduels réduit).

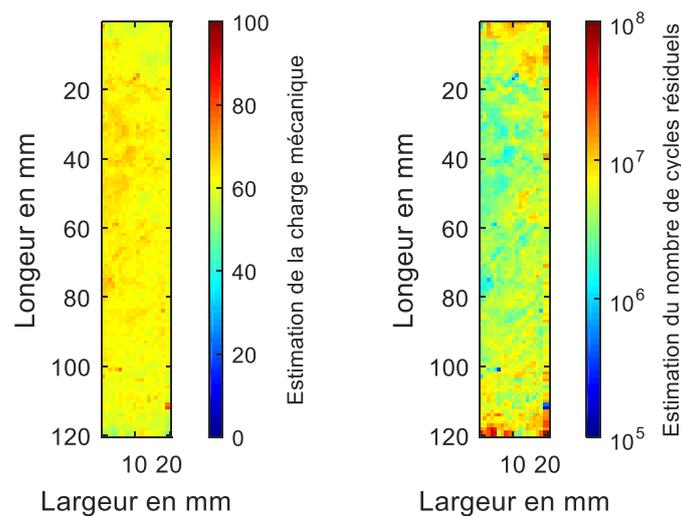


figure IV-15 : Estimation du chargement mécanique et de la durée de vie résiduelle à 60% de charge à rupture

Cette méthode d'estimation de la durée de vie résiduelle du matériau a été appliquée pour tous les blocs de chargement (de 10% à 80% UTS) subis par une éprouvette dont les données n'ont pas servi à l'apprentissage du réseau de neurones.

L'estimation de la durée de vie résiduelle du matériau, en fonction du niveau de chargement prédit par réseau de neurones, a été effectuée en considérant les résultats obtenus dans le cas de la fusion de haut niveau (figure IV-16) Comme attendu, plus le chargement est élevé moins la durée de vie résiduelle est longue. A 60% UTS, identifiée comme limite d'endurance

du matériau, la durée de vie résiduelle est estimée à plus de  $10^{7.3}$  cycles. Au dernier chargement mécanique (80% UTS) la rupture finale du matériau est quasi-imminente ( $\sim 10000$  cycles).

En somme, cette méthode d'estimation de la durée de vie résiduelle du matériau, sous sollicitation de fatigue instrumentée par plusieurs techniques non destructives, présente trois avantages majeurs : i) estimation en temps réel, ii) fiabilité de l'estimation grâce à la fusion de données, iii) estimation à l'échelle du pixel ( $1 \text{ mm}^2$ ).

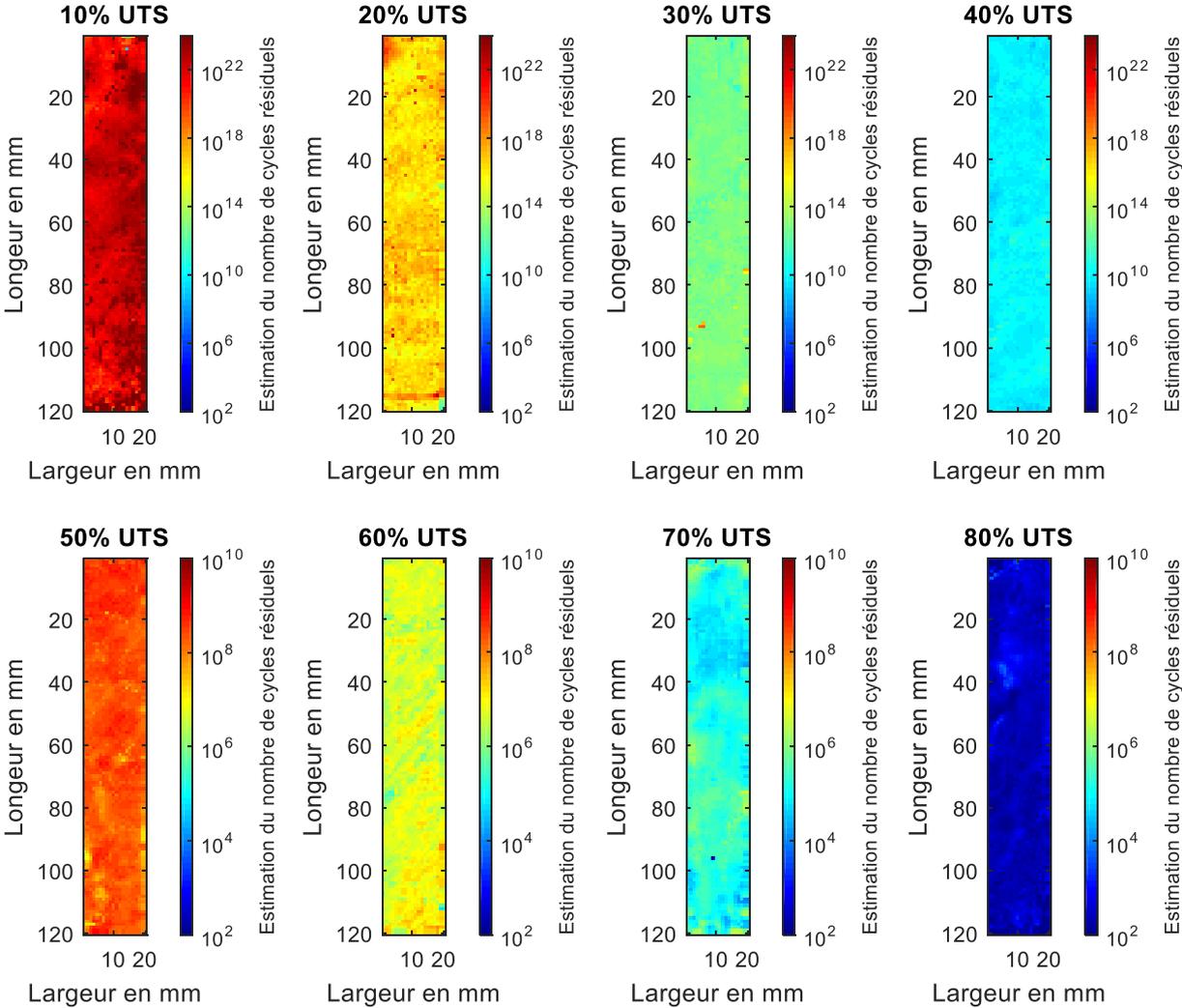


figure IV-16 : Durée de vie résiduelle du matériau à chaque chargement de fatigue

## IV.5. Capacités d'extrapolation des réseaux

Les résultats précédents ont été obtenus à l'aide d'un réseau de neurones mis au point et entraîné sur l'ensemble des chargements mécaniques appliqués. Il serait intéressant d'étudier la possibilité d'extrapolation des résultats du réseau de neurones dans le cas d'entraînements partiels en utilisant seulement les données des premiers chargements mécaniques. Ainsi, les réseaux seront entraînés, en cascade, avec un nombre croissant de données jusqu'à parvenir à une estimation acceptable (<10% d'erreur) permettant une anticipation correcte de l'état « futur » de l'éprouvette considérée. Cette étude est réalisée dans le cas de la fusion de haut niveau.

### IV.5.1. Entraînement partiel des réseaux de neurones

La figure IV-17 présente l'évolution de l'erreur du réseau de neurones en fonction des données des blocs de fatigue successivement appliqués pour son apprentissage. Cette erreur est calculée sur l'ensemble des huit blocs de fatigue et non sur les seuls niveaux de chargements utilisés pour l'entraînement.

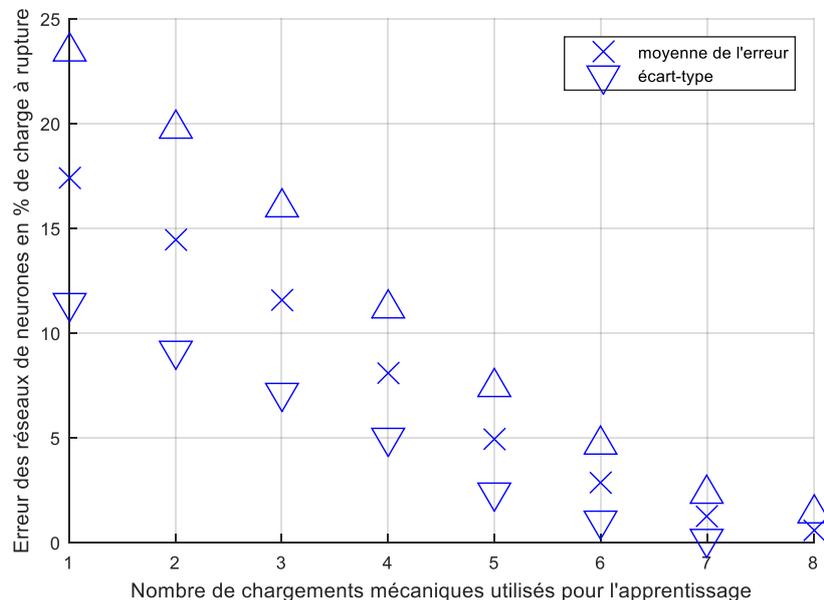


figure IV-17 : Erreur des réseaux en fonction du nombre de blocs de fatigue utilisés pour l'apprentissage

L'augmentation de la quantité de données, correspondant au nombre de blocs de fatigue, génère une diminution de l'erreur d'estimation des chargements appliqués. De fait, il est logique d'observer une forte erreur et un écart-type important lorsque seuls les premiers

chargements mécaniques sont utilisés. Au contraire, si davantage de blocs de fatigue sont intégrés à l'entraînement des réseaux, l'erreur moyenne et l'écart-type diminuent et atteignent les valeurs décrites dans la partie précédente.

Afin d'assurer une estimation acceptable des chargements appliqués (i.e. erreur inférieure à 10%), il apparaît indispensable d'utiliser, au minimum, les données des quatre premiers blocs de fatigue pour l'apprentissage du réseau de neurones. Utiliser les données des cinq premiers chargements permettra une meilleure précision du réseau (inférieure à 5%).

Il serait donc envisageable de prédire des niveaux de chargement supérieurs auxquels serait soumis le matériau en exploitant seulement les chargements inférieurs à 50% UTS.

#### **IV.5.2. Caractérisation en fatigue**

La figure IV-18 compare les chargements mécaniques estimés par le réseau de neurones partiellement entraîné (les cinq premiers blocs uniquement) et ceux réellement appliqués. La coïncidence entre valeurs réelles et estimées est quasiment parfaite, même au-delà de la limite d'endurance du matériau, jusqu'à 70% UTS. Au-delà de ce niveau, la prédiction des réseaux de neurones n'est plus correcte et présente un décalage de l'ordre de 15% pour le chargement à 80% UTS. Néanmoins, ce décalage sur l'estimation de la durée de vie résiduelle du matériau par le même réseau partiellement entraîné est très faible, ne dépassant pas 1000 cycles par rapport à la ruine, ce qui reste acceptable en fatigue (figure IV-19).

La figure IV-20 présente les cartographies d'estimation des différents chargements mécaniques, à l'échelle du pixel sur l'éprouvette, par le réseau partiellement entraîné. Les prédictions issues du réseau de neurones sont satisfaisantes jusqu'à 70% UTS, mais pas au-delà.

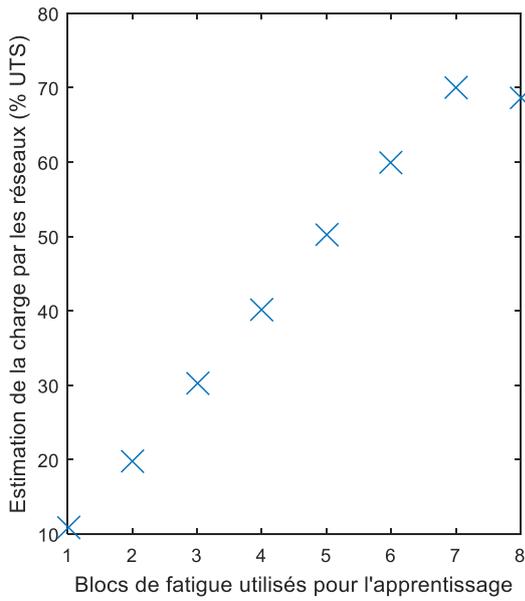


figure IV-18 : Comparaison entre chargements réellement appliqués et estimés

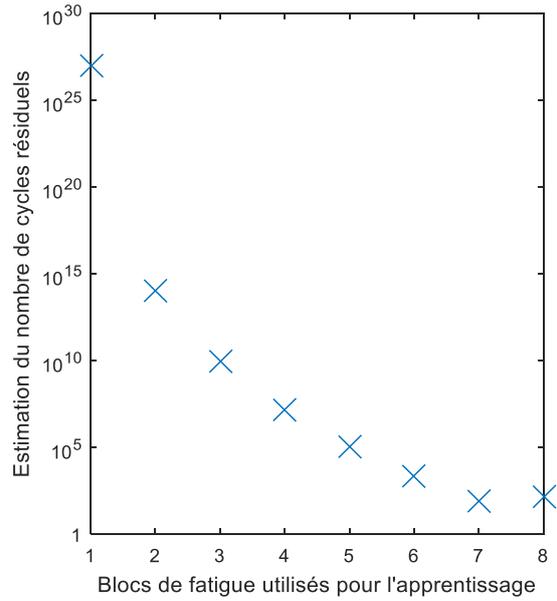


figure IV-19 : Evolution de l'estimation du nombre de cycles résiduels en fonction des blocs de chargements utilisés pour l'entraînement du réseau

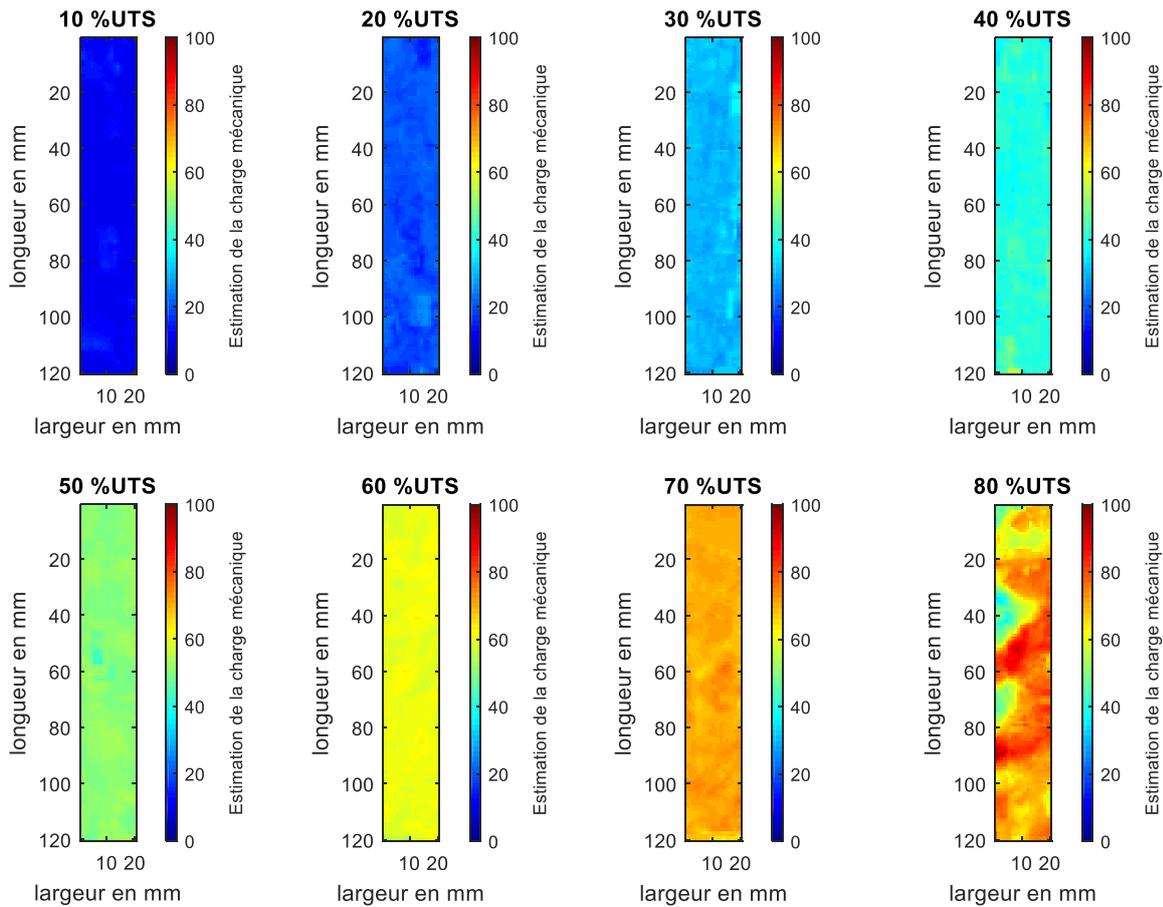


figure IV-20 : Cartographies de l'estimation de charge mécanique avec entrainement partiel

En somme, la prédiction de niveaux de chargements supportés par le matériau -et donc de sa durée de vie résiduelle- est envisageable à l'aide d'un réseau partiellement entraîné par les données correspondant à des chargements inférieurs à la limite d'endurance. Cette faisabilité mérite d'être approfondie en adoptant d'autres algorithmes de prédiction dynamique comme les « machines learning » ou les réseaux à apprentissage profond « deep learning ».

## **IV.6. Conclusion**

Différentes stratégies de fusion de données ont été étudiées de manière à sélectionner la plus pertinente et l'appliquer aux données recueillies lors des essais d'auto-échauffement par fatigue à différents niveaux de chargement de 10% à 80% UTS. La fusion par réseaux de neurones a été choisie en raison de ses capacités : i) à estimer avec précision les différents chargements appliqués au matériau et sa durée de vie résiduelle, ii) à identifier les niveaux de chargements générateurs d'endommagement auxquels le matériau serait éventuellement soumis.

La fusion de données homogènes intra-techniques a montré que plus il y a de paramètres à fusionner plus la précision est élevée. La fusion de données hétérogènes inter-techniques exploitant les données de plusieurs techniques non destructives génère de meilleurs résultats que la fusion intra-technique. La fusion inter-techniques de haut niveau combinant les résultats des fusions intra-techniques s'est avérée, dans notre cas d'étude, être la meilleure en termes de précision de l'estimation de la charge mécanique et de la durée de vie résiduelle du composite.

En revanche, la fusion par réseau de neurone nécessite, pour être efficace, de disposer d'un grand nombre de données pour l'apprentissage. Cette contrainte a été satisfaite, ici, en mettant en place une stratégie de fusion d'images à l'échelle des pixels.

Enfin, les capacités d'extrapolation et de prédiction « pseudo-dynamique » du réseau de neurones partiellement entraîné ont été analysées. La faisabilité d'une telle approche a été démontrée. Ceci ouvre une perspective intéressante à investir pour la prédiction des états

d'endommagement en fatigue des composites à l'aide d'algorithmes avancés de type « deep learning » ou « machine learning ».

## **Conclusion générale**

L'endommagement des matériaux composites sous sollicitation mécanique de fatigue est un phénomène complexe dont la caractérisation reste, à ce jour, encore imparfaite. L'analyse de la littérature, très abondante sur ce sujet, a permis de mettre en lumière les techniques de contrôle non destructif les plus utilisées pour la caractérisation de ce phénomène, à savoir l'émission acoustique, la thermographie infrarouge, la corrélation d'images numériques et les ultrasons. Cependant, en pratique, les limitations propres à chaque technique utilisée ne permettent pas de réaliser un diagnostic précis et complet de l'état de santé des structures composites. Aussi, le travail entrepris dans cette thèse avait pour objectif principal la caractérisation de l'endommagement de matériaux composites, sous chargements de fatigue, en développant et mettant en œuvre une approche non destructive multi-technique avec fusion de données, par réseau de neurones, pour améliorer le diagnostic et le pronostic de la durée de vie résiduelle du matériau.

Le matériau d'étude, visant une application aéronautique, est un composite à fibres de carbone et résine époxy élaboré avec un empilement quasi-isotrope transverse symétrique  $[-45/90/45/0]_s$ . La sollicitation mécanique appliquée au matériau est de type fatigue (traction-traction) par blocs de chargements de 3000 cycles croissants en amplitude de contrainte (de 10% à 80% UTS). Des dispositifs expérimentaux, nécessaires à la réalisation des essais multi-techniques, ont été conçus dont une enceinte d'isolation de la scène de mesure des perturbations environnantes (thermiques, acoustiques et optiques). Six méthodes non destructives ont été mises en œuvre, dans le cadre de cette approche multi-technique, dont trois implémentées in-situ et en temps réel (thermographie infrarouge, corrélation d'images numériques et émission acoustique) et trois autres en temps différé (onde de Lamb, C-Scan et acousto-ultrasons). Le protocole expérimental appliqué a permis la synchronisation des trois premières mesures in-situ avec les essais de fatigue et un bon séquençement avec celles opérées ex-situ en temps différé.

Les différentes données obtenues ont été analysées technique par technique, dans un premier temps, puis fusionnées, dans un second temps, pour optimiser et compléter le diagnostic de l'état d'endommagement du matériau.

Ainsi, les données de la thermographie infrarouge passive, appliquée in-situ et en temps réel sous sollicitation de fatigue en auto-échauffement, ont été exploitées à l'aide d'une fonction

de régression décrivant le comportement thermomécanique global du matériau composé de trois régimes : thermoélastique, dissipatif transitoire et permanent. L'analyse du comportement dissipatif a permis l'évaluation et la localisation des dégradations et l'identification d'un seuil d'endommagement à 47% UTS inférieur à la limite d'endurance du matériau (60% UTS).

La corrélation d'images numériques a permis la mesure des champs de déformation sur la surface du matériau en mettant en évidence des zones de concentration de contraintes, surtout à 70% et 80% UTS. L'analyse des aires d'hystérésis (contrainte-déformation) de tous les blocs de fatigue appliqués a permis l'évaluation du seuil d'endommagement du matériau, identique à celui obtenu par les températures stabilisées en thermographie infrarouge.

Les émissions acoustiques détectées, par les deux capteurs piézoélectriques, ont été localisées en 2D grâce à la mise en place d'un réseau de neurones permettant d'établir des cartographies d'évènements. Cette représentation imagée des résultats de l'émission acoustique est inédite, et cruciale pour la fusion de données.

Hors contraintes, après chaque bloc de chargement, les ultrasons ont été appliqués sous trois formes différentes, à savoir les ondes de Lamb, un C-Scan et les acousto-ultrasons. Les résultats obtenus avec les deux premières méthodes ultrasonores permettent une évaluation globale de l'état d'endommagement du matériau. La sensibilité de détection a été nettement améliorée en mettant au point une nouvelle méthode acousto-ultrasonore permettant la localisation, sous forme de cartographie, des micro-endommagements créés dans le matériau sous les différents chargements appliqués de 10% à 80% UTS.

L'analyse des résultats issus des différentes techniques de contrôle non destructif a montré une certaine convergence de leurs diagnostics, mais avec des sensibilités différentes à l'état d'endommagement du matériau sous les différents chargements appliqués. L'ensemble de ces résultats hétérogènes, préalablement homogénéisés sous forme de cartographies, a été combiné à l'aide de différentes stratégies de fusion de données pour améliorer le diagnostic de l'état de santé du matériau. Les réseaux de neurones ont été choisis et mis au point pour réaliser cette fusion de données intra- et inter-techniques de niveaux intermédiaire et haut. La fusion de données de haut niveau, combinant les résultats de fusions intra-techniques, a permis d'améliorer la précision du diagnostic de l'état de chargement du matériau et le

pronostic de sa durée de vie résiduelle. Enfin, le réseau de neurones mis au point a démontré sa capacité à estimer les niveaux de futurs chargements mécaniques auxquels le matériau serait éventuellement soumis, moyennant un apprentissage partiel avec des données préalablement acquises sur des sollicitations en deçà de sa limite d'endurance.

En conclusion, a ainsi été confirmé le fort potentiel de cette approche multi-technique non destructive permettant un diagnostic précis et complet de l'état de santé du matériau et un pronostic de sa durée de vie résiduelle. Ceci laisse présager la possibilité de mettre en place un contrôle industriel de l'état d'endommagement des structures en composites soumises à des sollicitations en fatigue.

A ce stade, plusieurs perspectives scientifiques et industrielles sont envisageables :

- Validation du potentiel de cette approche multi-technique non destructive sur d'autres types de matériaux : composites thermoplastiques (utilisés dans l'industrie de l'automobile...), composites céramiques (utilisés dans l'aérospatial...), etc.
- Application sur des pièces réelles (aéronautiques, équipements sous pression...) pour appréhender les problèmes liés à la géométrie et à l'échelle de mesure, et gagner en niveau de maturité technologique (TRL > 4).
- Prise en compte d'endommagements induits par d'autres sollicitations (impact ou vieillissement hygrothermique par exemple) pour augmenter le potentiel d'adoption de cette approche par le secteur de l'aéronautique.
- Recours à l'intelligence artificielle (deep learning, machine learning...).

# **Annexes**

## **A. Méthode d'interpolation des données**

### *Principe de la méthode*

La méthode de redimensionnement des données pour obtenir des matrices homogènes a été appliquée identiquement dans toute la thèse. Elle repose principalement sur les fonctions `interp1` et `interp2` de Matlab. Cette fonction nécessite un vecteur et ses abscisses pour interpoler les nouvelles valeurs sur les nouvelles abscisses recherchées.

En complément de cette fonction matlab, différents cas sont envisagés pour évaluer le format de l'entrée (scalaire, vecteur ligne ou colonne ou matrice). Ceci a permis d'introduire plus de souplesse au code et de rendre cette fonction généralisable à l'ensemble des données de la thèse.

Cette méthode est appliquée avec des vecteurs ou des images mais est également généralisée aux vidéos obtenues (succession d'images).

## **B. Méthodologie d'analyse des résultats en corrélation d'images numériques**

### *Méthodologie appliquée aux déformations et directions de déformations principales*

Le logiciel VIC 3D permet l'obtention des valeurs des déformations longitudinales, transversales et des directions principales. Les résultats ont été obtenus sous forme de matrices dépendant de la taille de subset utilisée. Dans cette thèse, les matrices comportent 77 éléments dans le sens de la longueur de l'éprouvette et 13 éléments dans le sens de sa largeur. Ces données sont ensuite interpolées pour parvenir à une résolution de l'ordre du millimètre (matrice de taille 120\*20). Chaque image a été enregistrée dans une matrice contenant les images de tout le chargement mécanique réalisé soit 120\*20\*18750 éléments.

### *Partitionnement des données*

Afin de réaliser le suivi continu des déformations, des valeurs moyennes, minimales et maximales, ont été évaluées pour des sous-partitions du chargement principal. Une réduction de la quantité de données à analyser est réalisée en évaluant ces paramètres toutes les 30 secondes. Les résultats ainsi mis en forme ont permis la visualisation sous forme d'images des résultats et un suivi continu de la propagation de la charge mécanique.

### *Méthodologie d'analyse de l'aire de l'hystérésis*

L'aire de l'hystérésis a été calculée à partir des données précédentes et des valeurs de charge mécanique enregistrées avec la corrélation d'images numériques. Un cycle complet de charge a été régénéré à partir de quatre secondes d'essai (16 points) comme décrit au chapitre II. Le calcul de l'aire sous la courbe du cycle a été réalisé à l'aide de la fonction matlab associée (polyarea).

Ce procédé a été appliqué à l'échelle macroscopique et à celle du mm<sup>2</sup> (utilisation de deux boucles *for* imbriquées)

### **C. Rappels sur les réseaux de neurones**

Un réseau de neurones artificiels est un système initialement inspiré du fonctionnement des neurones biologiques puis cette méthode s'est rapprochée des méthodes statistiques. Ces réseaux sont optimisés avec des méthodes d'apprentissage. Pour cela, un grand nombre de données sont nécessaires. Les applications sont multiples : simulation de mécanismes perceptifs, classifications rapides ou encore vérification du fonctionnement des neurones biologiques.

#### *Modélisation d'un neurone formel*

Un neurone est une entité numérique ou autre dotée d'une fonction de transfert permettant le passage d'une entrée à une sortie selon des règles précises (par exemple : somme des entrées et comparaison à une valeur seuil). Les neurones numériques ne reposent pas sur un programme classique dont toutes les variables sont programmées mais sur les connexions synaptiques entre les différents neurones et leurs interactions.

Un neurone artificiel se divise en deux parties distinctes. La première est la fonction de combinaison qui assure le lien entre le neurone considéré et les neurones/ entrées de la couche précédente. A chaque lien est attribué un poids dit « synaptique ». La combinaison est commune à tous les réseaux de neurones :

$$Y = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (1)$$

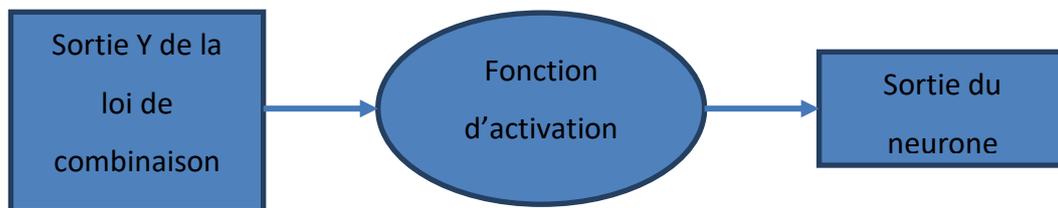
Avec :

- Y la sortie de la fonction de combinaison

- $n$  le nombre de neurones de la couche précédente
- $x_i$  la sortie du neurone  $i$  de la couche précédente
- $w_i$  le poids de la connexion synaptique avec le neurone  $i$  de la couche précédente

Si aucune modification supplémentaire n'est ajoutée au réseau de neurones, l'utilisation de plusieurs couches revient à appliquer des matrices de transformation d'applications linéaires en cascades.

Les non-linéarités des réseaux de neurones sont introduites à l'aide d'une fonction d'activation prenant en entrée la variable  $Y$  précédente. Plusieurs types de fonction existent, les fonctions de seuillage (seuil bas, haut, médian) ou bien encore des fonctions plus continues comme une sigmoïde, la tangente hyperbolique ou la fonction de Heaviside.



La sortie du neurone est alors comparée à la sortie fournie par l'opérateur s'il s'agit du neurone résultat. En phase d'apprentissage l'erreur introduite est alors utilisée pour une nouvelle évaluation des poids synaptiques.

### *Limites*

Pour obtenir un réseau de neurones efficace, il est nécessaire de fournir un nombre de cas d'apprentissage d'autant plus important que le problème est complexe.

Les réseaux de neurones présentent également une sensibilité importante au surapprentissage ou « apprentissage par cœur » qui résulte d'une trop grande liberté dans le choix du modèle. Ce phénomène réduit grandement les capacités de prédiction des réseaux sur de nouveaux échantillons. En pratique, il est possible de réduire son effet en diminuant le nombre de neurones à entraîner.

### *Structures plus complexes*

Afin de mieux propager et prendre en compte l'erreur du réseau, il est possible de mettre en place une rétropropagation de l'information entre les neurones et entre les différentes couches.

Afin de réduire la sensibilité au surapprentissage des réseaux de neurones, il est possible d'utiliser une méthode d'étalement coupant les connexions synaptiques ayant l'influence la plus faible sur l'erreur de sortie du réseau.

Pour une gestion optimale des données entre apprentissage et entraînement, une méthodologie basée sur la validation croisée peut-être envisagée. Elle consiste en la séparation des données en deux sous-ensembles : le premier pour l'entraînement et le second pour la validation.

La méthodologie dite de « crossfit » est une méthodologie complexe de séparation des données. L'ensemble initial des cas disponibles est partitionné en 10 sous-parties. Les ensembles 1 à 9 sont utilisés pour l'entraînement, le dixième pour la validation. Ceci permet de générer un réseau de neurones. Un second est mis en place avec les ensembles 1 et 3 à 10, le second est utilisé pour la validation, ... Ceci permet de générer 10 réseaux de neurones et de ne conserver que le/ les plus pertinents.

### *Analyse parallèle*

Plusieurs stratégies sont également envisageables avec les réseaux de neurones. Pour réduire les erreurs d'un seul réseau, il est possible de les faire interagir en parallèle et d'estimer le résultat final avec un vote entre les différents résultats.

Cette méthode est également utilisée pour comparer différentes méthodes d'apprentissage entre elles. Le résultat définitif peut alors être estimé à partir de réseaux de neurones, de machines à support de vecteurs, ...

## **D. Méthodologie d'entraînement des réseaux de neurones en émission acoustique**

### *Export des données*

Les données de chaque chargement mécanique ont été exportées avec celles de la charge mécanique de la machine de fatigue. Tous ces paramètres (décrit au chapitre II) sont ainsi enregistrés suivant leurs temps d'arrivée.

Le document texte généré est alors importé sur Matlab pour l'entraînement des réseaux de neurones de localisation.

### *Réseaux de neurones pour la localisation*

Le descriptif de la méthode a déjà été développé dans le chapitre II. Cette partie se concentre donc sur les réseaux et méthodologies envisagés et non présentés en résultats de thèse.

La localisation a également été commencée avec les résultats des capteurs utilisés seuls. Cependant, la précision des résultats obtenus n'était pas satisfaisante car localisés uniquement dans une zone proche du capteur étudié. La structure des réseaux reste la même, avec une entrée pour chaque paramètre acoustique (13 neurones d'entrée). Afin de compenser ce manque de précision, une analyse réalisée avec deux capteurs étudiés séparément a également été menée avec succès. Le but était de fusionner les deux cartographies sur le même principe que la fusion des données des acousto-ultrasons.

Les données d'entrées ont également été analysées et utilisées dans le cas de deux types d'entraînements différents : utilisation des données brutes (trois séries de données pour un point du maillage) ou utilisation des données moyennées afin d'éviter d'introduire des effets de dispersion matériau.

Pour localiser les émissions acoustiques, différents neurones ont été envisagés, notamment pour remplacer la fonction intégrale introduite par défaut avec Matlab qui n'est pas fortement documentée. La précision des réseaux de neurones obtenus dans ces configurations n'a jamais abouti à des résultats supérieurs à ceux de la fonction utilisée par défaut dans Matlab.

Le nombre de couches à entraîner du réseau a été aussi envisagée. Malheureusement, plus ce paramètre est élevé plus la quantité de données nécessaire à un apprentissage de qualité augmente. Les 92 points du maillage ne devaient pas être suffisants pour mener à bien cette analyse (obtention de résultats médiocres).

Le nombre de sortie (x seul, y seul ou x et y simultanément) est une possibilité qui a été envisagée. Cependant, plus le nombre de sorties demandées au réseau augmente, plus la

quantité de données nécessaires à un entraînement de qualité augmente. A nouveau, les résultats obtenus dans le cas deux sorties pour les réseaux étaient médiocres.

### *Vérification de la qualité du réseau*

Afin d'assurer la qualité de l'entraînement du réseau, seul le plus précis est conservé après la génération de 100 réseaux à chaque point de chargement mécanique. Une autre approche basée sur la préservation des trois réseaux les plus précis pour réaliser ensuite une stratégie de vote a été mise au point. La comparaison des résultats ne permettait pas de valider cette approche par rapport à un résultat issu d'un seul réseau.

## **E. Méthode de fusion des acousto-ultrasons**

### *Principe de la méthode*

La fusion des acousto-ultrasons a été réalisée à partir de l'extraction des données de cassés de mines (identique aux émissions acoustiques). Les données sont d'abord interpolées puis fusionnées. Les deux tâches ont été identifiées comme transitives (pas d'impact sur le résultat final).

La méthode est relativement simple à implémenter avec trois boucles for imbriquées (longueur, largeur et temps) puis la préservation du maximum du paramètre observé (variation d'amplitude ou de la fréquence d'initiation).

Dans le cas de l'interpolation, différentes formes ont été envisagées (linéaire, carré et de degré 3). A nouveau, les résultats les plus précis, en comparaison avec les données expérimentales, ont été obtenus avec l'interpolation linéaire.

Différentes fusions de données classiques ont été envisagées (maximum, moyenne, porte inclusive, ...). Seule la fusion de paramètre maximum a permis de réaliser une évaluation physiquement analysable de l'endommagement. Comme pour la fusion de données au chapitre IV les autres méthodologies présentent des limites dans la capacité d'analyse.

## **F. Mise en forme de la fonction d'interpolation en thermographie infrarouge**

L'endommagement des structures composites par fatigue est un phénomène basé sur la dissipation de l'énergie interne de l'éprouvette qui peut être détectée à l'aide d'une caméra infrarouge. Dans ce cas, trois phases représentatives de la propagation de

l'endommagement dans le matériau peuvent être observées. La première est la phase d'initiation durant laquelle un gradient important entre les variations de températures et le nombre de cycles. S'ensuit un état d'équilibre avec une quasi-asymptotique valeur de la température connue comme température de stabilisation. Durant cette phase, l'endommagement se propage dans l'ensemble du matériau jusqu'à générer une augmentation significative de la température du matériau (caractérisant la dernière phase) conduisant à la rupture après quelques cycles de fatigue supplémentaires.

Les deux premières phases sont très étudiées afin d'évaluer l'état d'endommagement du matériau. Une première modélisation se concentre sur la première phase en proposant une évolution de la température définie par l'équation (8) :

$$T(t) = T_0 + \Delta T \cdot f \cdot t + T_1 \sin(2\pi f t + \varphi_1) + T_2 \sin(2\pi 2f t + \varphi_2) \quad (2)$$

Avec :  $T_0$  la température de début de l'essai en °C,  $\Delta T$  l'augmentation moyenne de la température par cycle en °C,  $f$  la fréquence de sollicitation mécanique en Hz. Ces premiers paramètres permettent un suivi de la température moyenne de l'échantillon considéré. Néanmoins, la sollicitation mécanique introduit un effet thermoélastique qui ne peut être modélisé avec ces seuls paramètres. Afin d'obtenir une modélisation de ce phénomène, deux sinus, dont les pulsations sont fixées (fréquence de sollicitation mécanique et premier harmonique), complètent la fonction qui servira de support à la régression. Les paramètres à estimer sont alors l'amplitude thermique  $T_1$ , en °C, et la phase  $\varphi_1$ , en °, du premier et du second sinus ( $T_2$  et  $\varphi_2$ ).

Dans la littérature, cette modélisation est utilisée pour évaluer l'endommagement de quelques cycles de fatigue (10 à 100 cycles). Cependant, elle ne permet pas de réaliser le suivi sur les deux premières phases de la vie du matériau.

Pour pallier ce problème, une seconde modélisation développée par Crupi et al est proposée mais celle-ci ne prend pas en compte les effets thermoélastiques. Dans ce cas, l'évolution de la température s'exprime alors comme décrit dans l'équation (3)

$$T(N) = T_0 + T_{stab} \cdot (1 - e^{-N/\tau_N}) \quad (3)$$

Avec :  $T_0$  la température de début de l'essai en °C,  $T_{stab}$  la température de stabilisation du niveau de chargement considéré,  $N$  le nombre de cycles et  $\tau_N$  une constante en nombre de cycle pour parvenir à la stabilisation. Afin d'obtenir une seule modélisation pour un niveau de chargement qui prend en compte à la fois la température moyenne ainsi que l'effet thermoélastique de la sollicitation mécanique, il convient de vérifier la validité de l'équation (3) par rapport à l'équation (2).

Pour cela, il convient d'uniformiser les variables entre les deux équations, on conserve ainsi la variable temporelle en introduisant  $\tau_s$  la constante de temps en secondes estimée à partir de celle en nombre de cycles :

$$T(t) = T_0 + T_{stab} \cdot (1 - e^{-t/\tau_s}) \quad (4)$$

La première modélisation est utilisée lors de la première phase de la vie du matériau soit au début de chaque sollicitation mécanique, ainsi un développement limité de l'exponentielle à l'ordre 1 permet d'obtenir la relation suivante :

$$T(t) = T_0 + \frac{T_{stab}}{\tau_s} \cdot f \cdot t \quad (5)$$

On procède alors à une identification des coefficients entre les deux équations :

$$T(t) = T_0 + \frac{T_{stab}}{\tau_s} \cdot f \cdot t \quad (6)$$

$$T(t) = T_0 + \Delta T \cdot f \cdot t + T_1 \sin(2\pi f t + \varphi_1) + T_2 \sin(2\pi 2f t + \varphi_2) \quad (7)$$

Avec les définitions des paramètres précédents, il est alors possible d'assimiler  $\Delta T$  l'augmentation moyenne de la température par cycle en °C au rapport entre  $T_{stab}$  la température de stabilisation et  $\tau_s$  la constante en nombre de cycles pour parvenir à la stabilisation. On obtient ainsi la même fonction qu'avec l'équation (2).

Cette vérification étant réalisée, il est alors possible de définir la fonction de régression qui sera utilisée dans cette étude. Elle est basée sur les deux premiers modèles présentés et est évaluée sur les deux premières phases du chargement mécanique considéré.

$$T(t) = T_0 + T_{stab} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) + T_1 \sin(2\pi f t + \varphi_1) + T_2 \sin(2\pi 2f t + \varphi_2) \quad (8)$$

Cette nouvelle modélisation remplit les objectifs fixés avec l'évaluation de la température de l'éprouvette ainsi que l'effet thermoélastique introduit avec la sollicitation mécanique.

Dans la suite, les différents coefficients de la régression sont traités à l'échelle du  $\text{mm}^2$  et permet la mise en place de 6 paramètres d'endommagement ( $T_{stab}, \tau, T_1, T_2, \varphi_1, \varphi_2$ ).

### **G. Méthode d'interpolation en thermographie passive**

La méthodologie mathématique a déjà été développée précédemment. Cette annexe a pour but de présenter le code commenté utilisé pour réaliser l'interpolation la plus propre et fine possible.

### **H. Méthode de fusion des données**

Les réseaux de neurones utilisés pour le chapitre de fusion de données ont été générés à partir des premiers résultats obtenus dans le cas des émissions acoustiques. Les mêmes études d'influence de paramètre ont été réalisées :

- Les mêmes neurones ont permis l'obtention des résultats les plus précis (avec fonction intégration par défaut de Matlab).
- 100 itérations pour chaque entraînement pour assurer la qualité du réseau.
- Contrairement aux émissions acoustiques, il vaut mieux utiliser une stratégie de vote avec les trois meilleurs réseaux pour garantir une estimation précise de la charge mécanique appliquée sur le matériau.
- Bien que plus de données soient disponibles, cela n'influe pas sur la qualité de l'entraînement avec plusieurs couches de neurones.
- Le nombre de neurones de la couche caché a été fixé à trois fois le nombre d'entrée disponible (retour de la littérature, différence majeure avec les EA).
- Comme pour les EA, les données d'entraînement et de vérification sont séparées avec un ratio de 90%/10%. Le choix des données est aléatoire et non-redondant.

Afin d'obtenir les meilleurs résultats, plusieurs jeux de paramètres pour chaque technique ont été utilisés jusqu'à arriver à ceux présentés dans cette thèse. Une première approche a été de mener une étude par ACP. Cependant, les paramètres non-corrélés d'un chargement à un autre variaient.

## **Tables des figures et tableaux**

## Table des figures

figure I-1 : Evolution de l'endommagement d'un composite sous chargement de fatigue .....	7
figure I-2 : Différentes phases de l'endommagement d'un composite stratifié en fatigue (adapté d'après [6]).....	9
figure I-3 : Evaluation des différentes phases de l'endommagement des composites à l'aide de techniques non destructives .....	10
figure I-4 : Détermination de la résistance en fatigue par essais d'auto-échauffement [8]....	10
figure I-5 : (a) Loi de comportement mécanique et (b) température d'un matériau sollicité en fatigue dynamique [13] .....	11
figure I-6 : Transfert de modulation sur un composite à fibres de carbone entre (a) l'état de référence et (b) l'état après impact [65].....	17
figure I-7 : Contact entre les fibres expliquant l'augmentation de la résistivité (en pointillé) avant chargement et (en plein) sous chargement [79].....	20
figure I-8 : Principe de l'émission acoustique .....	22
figure I-9 : Evolution (a) de la contrainte et de la température au cours du temps lors d'un essai statique[119] et (b) de l'endommagement et de la température en fatigue au cours du temps [10] .....	26
figure I-10 : Evolution de l'indicateur défini sur la base du coefficient thermoélastique du composite sous chargement statique par paliers [120].....	27
figure I-11 : (a) Paliers de cycles de fatigue appliqués à niveaux de contrainte croissants (b) Détermination de la limite d'endurance sur la base des auto-échauffements induits (adaptée de [12]) .....	28
figure I-12 : Détermination de la limite d'endurance par essai statique [12].....	29
figure I-13 : Analyse de la phase en degrés d'un composite tissé verre/époxy lors d'un chargement de fatigue en traction-traction à 10% de charge à rupture: (a) 40 000 cycles and (b) 46 000 cycles [125] .....	29
figure I-14 : Principe de de la technique lock-in thermographie en mode réflexion [129] .....	30
figure I-15 : Principe de la méthode de corrélation d'images numériques .....	32
figure I-16 : Corrélation d'images numériques appliquée à un composite stratifié : (a) Eprouvette avec maillage superposé, (b) Cartographies de l'énergie volumique et du module, (c) éprouvette à la ruine [149] .....	33
figure I-17 : Principe du C-scan immersion en mode pulse-écho [155].....	36
figure I-18 : Evolution de la densité relative ( $\rho_{\text{avant chargement}} - \rho_{\text{après chargement}} / \rho_{\text{avant chargement}}$ ) de composites stratifiés [0°/90°]S à différents stades de chargement (adapté de [155]) .....	37
figure I-19 : Ondes symétriques (a) et antisymétriques (b) (adapté de [162]) .....	38
figure I-20 : Evolution de l'endommagement d'un composite suivant le nombre de milliers de cycles en fatigue [162].....	39
figure I-21 : Etude de l'état de santé d'un tube de verre/époxy en fatigue: (a) à 34%, (b) à 40%, (c) à 60%, (d) à 80%, (e) à 90%, (f) à 99% de durée de vie [167].....	39
figure I-22 : Utilisation possible des techniques de contrôle non destructif pour la détection des endommagements (étendue des domaines suggérés pour chaque technique ajustée selon la bibliographie) [6].....	40
figure I-23 : Indicateurs d'endommagement pour différentes méthodes d'essais non destructifs (adapté de [172, 174]).....	44

figure I-24 : Schématisation d'un réseau de neurones et du fonctionnement d'un neurone .	53
figure I-25 : Comparaison entre l'expérience et la prédiction d'un réseau de neurones pour l'estimation de la durée de vie d'un composite unidirectionnel [193].....	54
figure II-1 : Dimensions de l'éprouvette d'essai.....	60
figure II-2 : Lois de comportement en traction de 5 échantillons issus d'une même plaque de composite.....	62
figure II-3 : Courbe de Wöhler du composite carbone/époxy [-45/90/45/0] <sub>s</sub> (R=0.1, f=4Hz).	63
figure II-4 : Enceinte adiabatique positionnée sur la machine de fatigue (a) vue externe (b) vue interne .....	64
figure II-5 : Schéma du banc de mesure par ondes ultrasonores (a) ensemble du banc (b) zoom.....	65
figure II-6 : Dispositif C-scan dans différentes configurations (a) en mode réflexion (b) en mode transmission normale .....	65
figure II-7 : Augmentation de température moyenne de l'éprouvette composite sur 3000 cycles .....	67
figure II-8 : Schéma récapitulatif des différentes méthodes CND utilisées pendant l'essai....	69
figure II-9 : Positionnement de la caméra infrarouge en mode passif (a) vue de l'éprouvette, (b) vue du dessus.....	70
figure II-10 : Comparaison entre la température moyenne mesurée et la température calculée par régression pour différents niveaux de chargement mécanique .....	73
figure II-11 : Positionnement des caméras et spots de corrélation d'images à l'intérieur de l'enceinte d'isolation .....	74
figure II-12 : Exemple de mouchetis sur l'éprouvette en composite.....	75
figure II-13 : Cycle de chargement reconstitué à partir d'une seconde d'enregistrement (4 cycles).....	75
figure II-14 : Evolution de l'aire de l'hystérésis pour d'un composite stratifié [±45] verre/époxy sous fatigue en traction-traction [200] .....	76
figure II-15 : Schéma du traitement des données en suivi continu en corrélation d'images numériques .....	76
figure II-16 : Schéma de la chaîne d'acquisition des acousto-ultrasons .....	77
figure II-17 : Schéma du maillage de la zone d'étude.....	78
figure II-18 : Schéma des données utilisées pour la validation de l'interpolation.....	79
figure II-19 : Schéma de la fusion avec la règle de l'amplitude maximale.....	81
figure II-20 : Schéma de la chaîne d'acquisition de l'émission acoustique .....	82
figure II-21 : Définition des principaux paramètres temporels d'émission acoustique acquis par le dispositif d'émission acoustique .....	83
figure II-22 : Représentation des différentes fenêtres temporelles sur une salve d'émission acoustique [173].....	85
figure II-23 : Entraînement des réseaux de neurones pour la localisation des ondes acoustiques.....	87
figure II-24 : Application des réseaux sur les données de fatigue .....	88
figure II-25 : Détermination de la vitesse V33 en mode transmission.....	89
figure II-26 : Chaîne d'acquisition des ondes de Lamb .....	90

figure III-1 : Evolution de l'échauffement du composite en fonction du nombre de cycles pour différents niveaux de chargement mécanique et températures de stabilisation associées.....	94
figure III-2 : Cartographies de l'amplitude thermique du mode fondamental en °C.....	96
figure III-3 : Cartographies de la phase du mode fondamental en radians .....	97
figure III-4 : Cartographies de l'amplitude thermique de la première harmonique en °C .....	99
figure III-5 : Evolution de l'hystérésis suivant le nombre de cycles à 80% de charge.....	101
figure III-6 : Evolution de l'aire de l'hystérésis pour chaque bloc de fatigue.....	102
figure III-7 : Evaluation de la limite d'endurance du composite par interpolation bilinéaire en corrélation d'images numériques .....	103
figure III-8 : Suivi de l'endommagement à l'aide de l'aire de l'hystérésis .....	105
figure III-9 : Cartographies des déformations (en %) dans le sens longitudinal .....	106
figure III-10 : Cartographies de la première déformation principale.....	108
figure III-11 : Cartographies de la seconde déformation principale .....	109
figure III-12 : Fusion des cartographies (a) capteur 1, (b) capteur 2 et (c) fusion des résultats précédents dans le cas d'une sollicitation mécanique à 80% de charge à rupture.....	113
figure III-13 : Evolution de la variation de l'amplitude pour le suivi de l'endommagement mécanique.....	114
figure III-14 : Evolution de la variation de la fréquence d'initiation pour le suivi de l'endommagement mécanique .....	115
figure III-15 : Slaves acoustiques enregistrées en fonction du chargement mécanique appliqué pour des blocs de fatigue croissants .....	117
figure III-16 : Evolution de l'amplitude en continu sur l'ensemble des blocs de fatigue.....	118
figure III-17 : Comparaison des résultats de localisation suivant la configuration utilisée (capteurs seuls ou ensemble) .....	120
figure III-18 : Suivi de l'endommagement mécanique à l'aide du nombre d'évènements localisés .....	121
figure III-19 : Cartographies de l'amplitude transmise en caractérisation ultrasonore .....	124
figure III-20 : Cartographies du temps de vol en caractérisation ultrasonore.....	125
figure III-21 Influence de l'endommagement sur les ondes de Lamb (état initial et quasi-rupture) .....	126
figure III-22 : Evolution de l'amplitude temporelle en fonction du chargement mécanique	127
figure IV-1 : Fusion de données via opérateur maximum pour différents niveaux de chargement mécanique (en % UTS).....	135
figure IV-2 : Nuancier et distribution en nuance de gris pour la définition des masses de croyances (adapté de [184]).....	135
figure IV-3 : Définition et calcul des masses de croyances à partir des niveaux de gris (adapté de [184]) .....	136
figure IV-4 : Définition des classes avec Dempster-Shafer .....	137
figure IV-5 : Fusion de données de Dempster-Shafer avec filtre médian pour différents niveaux de chargement mécanique (en % UTS).....	137
figure IV-6 : Fusion de données par réseaux de neurones pour différents niveaux de chargement mécanique (en %UTS) pour une éprouvette inconnue du réseau .....	139
figure IV-7 : Génération d'un réseau de neurones en thermographie infrarouge .....	141
figure IV-8 : Fusion des indicateurs de thermographie passive en régression .....	143

figure IV-9 : Fusion des indicateurs de corrélation d'images numériques .....	144
figure IV-10 : Fusion des indicateurs d'acousto-ultrasons.....	145
figure IV-11 : Schéma de la fusion de haut niveau.....	147
figure IV-12 : Cartographies de fusion de haut niveau pour chaque bloc de fatigue .....	148
figure IV-13 : Schéma de la fusion de niveau intermédiaire .....	149
figure IV-14 : Fusion de l'ensemble des indicateurs multi-techniques.....	149
figure IV-15 : Estimation du chargement mécanique et de la durée de vie résiduelle à 60% de charge à rupture.....	151
figure IV-16 : Durée de vie résiduelle du matériau à chaque chargement de fatigue.....	152
figure IV-17 : Erreur des réseaux en fonction du nombre de blocs de fatigue utilisés pour l'apprentissage .....	153
figure IV-18 : Comparaison entre chargements réellement appliqués et estimés.....	155
figure IV-19 : Evolution de l'estimation du nombre de cycles résiduels en fonction des blocs de chargements utilisés pour l'entraînement du réseau.....	155
figure IV-20 : Cartographies de l'estimation de charge mécanique avec entraînement partiel .....	155

## Table des tableaux

Tableau I-1 : Applicabilité des techniques de contrôle non destructif pour la détection et la caractérisation de l'endommagement avec avantages et limites associées [6].....	41
Tableau I-2 : Comparaison des différents niveaux de fusion [185] .....	51
Tableau II-1 : Propriétés mécaniques et physiques du pré-imprégné (données Hexcel) .....	60
Tableau II-2 : Propriétés thermiques du composite quasi-isotrope .....	61
Tableau II-3 : Propriétés mécaniques en traction du composite quasi-isotrope.....	61
Tableau II-4 : Augmentation de la température de l'éprouvette pour différents chargements de fatigue à 4Hz.....	62
Tableau II-5 : Caractéristiques des différents niveaux de chargement mécanique appliqués	67
Tableau II-6 : Evaluation de la répétabilité des cassés de mines .....	79
Tableau II-7 : Evaluation de la qualité de l'interpolation .....	80
Tableau II-8 : Caractéristiques des capteurs d'émission acoustique (Mistras Eurosonics) .....	83
Tableau II-9 : Résultats en amplitude (dB) des tests AST pour les différents capteurs d'émission acoustique.....	84
Tableau II-10 : Evaluation des paramètres d'émissions acoustique pour l'acquisition .....	85
Tableau II-11 : Evaluation des écarts moyens pour les localisations en X et en Y.....	87
Tableau IV-1 : Récapitulatif des différentes fusions .....	139
Tableau IV-2 : Erreur moyenne et écarts-types des méthodes de fusions.....	150

# **Bibliographie**

- [1] S. Barré and M. Benzeggagh, "On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fibre-reinforced polypropylene," *Composites Science and Technology*, vol. 52, 1994.
- [2] V. Munoz, B. Valès, M. Perrin, M. L. Pastor, H. Weleman, A. Cantarel, *et al.*, "Damage detection in CFRP by coupling acoustic emission and infrared thermography," *Composites Part B: Engineering*, vol. 85, 2016.
- [3] J. Berthelot, "Relation between amplitudes and rupture mechanisms in composite materials," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 7, 1988.
- [4] V. A. Passipoularidis, T. P. Philippidis, and P. Brondsted, "Fatigue life prediction in composites using progressive damage modelling under block and spectrum loading," *International Journal of Fatigue*, vol. 33, 2011.
- [5] N. L. Post, S. W. Case, and J. J. Lesko, "Modeling the variable amplitude fatigue of composite materials: A review and evaluation of the state of the art for spectrum loading," *International Journal of Fatigue*, vol. 30, 2008.
- [6] P. Duchene, S. Chaki, A. Ayadi, and P. Krawczak, "A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites," *Journal of Materials Science*, 2018.
- [7] T. Peng, Y. Liu, A. Saxena, and K. Goebel, "In-situ fatigue life prognosis for composite laminates based on stiffness degradation," *Composite Structures*, vol. 132, 2015.
- [8] J. Montesano, Z. Fawaz, and H. Bougherara, "Non-destructive assessment of the fatigue strength and damage progression of satin woven fiber reinforced polymer matrix composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 71, 2015.
- [9] S. Momon, M. Moevus, N. Godin, M. R'Mili, P. Reynaud, G. Fantozzi, *et al.*, "Acoustic emission and lifetime prediction during static fatigue tests on ceramic-matrix-composite at high temperature under air," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, 2010.
- [10] L. Toubal, M. Karama, and B. Lorrain, "Damage evolution and infrared thermography in woven composite laminates under fatigue loading," *International Journal of Fatigue*, vol. 28, 2006.
- [11] A. Risitano, A. Geraci, and G. La Rosa, "Sistema di prova per la determinazione paida del limite di fatica dei materiali," Italia Patent IT1237378B, 1988.
- [12] C. Colombo, F. Libonati, F. Pezzani, A. Salerno, and L. Vergani, "Fatigue behaviour of a GFRP laminate by thermographic measurements," *Procedia Engineering*, vol. 10, 2011.
- [13] T. Ummenhofer and J. Medgenberg, "On the use of infrared thermography for the analysis of fatigue damage processes in welded joints," *International Journal of Fatigue*, vol. 31, 2009.
- [14] L. Broutman and S. Sahu, "A new theory to predict cumulative fatigue damage in fiberglass reinforced plastics," *Composite materials: testing and design*, vol. 497, 1972.
- [15] M. Bourchak, I. Farrow, I. Bond, C. Rowland, and F. Menan, "Acoustic emission energy as a fatigue damage parameter for CFRP composites," *International Journal of Fatigue*, vol. 29, 2007.
- [16] A. Benaarbia, A. Chrysochoos, and G. Robert, "Kinetics of stored and dissipated energies associated with cyclic loadings of dry polyamide 6.6 specimens," *Polymer Testing*, vol. 34, 2014.
- [17] Y. Y. Hung and H. P. Ho, "Shearography: An optical measurement technique and applications," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 49, 2005.
- [18] W. Murri, B. Sermon, R. Andersen, L. Martinez, E. Van der Heiden, and C. Garner, "Defects in thick composites and some methods to locate them," in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, ed: Springer, 1991, pp. 1583-1590.

- [19] G. De Angelis, M. Meo, D. P. Almond, S. G. Pickering, and S. L. Angioni, "A new technique to detect defect size and depth in composite structures using digital shearography and unconstrained optimization," *NDT & E International*, vol. 45, 2012.
- [20] Y. Y. Hung, Y. S. Chen, S. P. Ng, L. Liu, Y. H. Huang, B. L. Luk, *et al.*, "Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 64, 2009.
- [21] F. Taillade, M. Quiertant, K. Benzarti, and C. Aubagnac, "Shearography and pulsed stimulated infrared thermography applied to a nondestructive evaluation of FRP strengthening systems bonded on concrete structures," *Construction and Building Materials*, vol. 25, 2011.
- [22] J.-R. Lee, J. Molimard, A. Vautrin, and Y. Surrel, "Application of grating shearography and speckle shearography to mechanical analysis of composite material," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, 2004.
- [23] Y. Y. Hung, W. D. Luo, L. Lin, and H. M. Shang, "Evaluating the soundness of bonding using shearography," *Composite Structures*, vol. 50, 2000.
- [24] J. P. Dunkers, R. S. Parnas, C. G. Zimba, R. C. Peterson, K. M. Flynn, J. G. Fujimoto, *et al.*, "Optical coherence tomography of glass reinforced polymer composites," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, 1999.
- [25] H. O. Nyongesa, A. W. Otieno, and P. L. Rosin, "Neural fuzzy analysis of delaminated composites from shearography imaging," *Composite Structures*, vol. 54, 2001.
- [26] H. Lopes, F. Ferreira, J. V. Araújo dos Santos, and P. Moreno-García, "Localization of damage with speckle shearography and higher order spatial derivatives," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 49, 2014.
- [27] Y. Y. Hung, L. X. Yang, and Y. H. Huang, "5 - Non-destructive evaluation (NDE) of composites: digital shearography A2 - Karbhari, Vistasp M," in *Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites*, ed: Woodhead Publishing, 2013, pp. 84-115.
- [28] J. Cheng, H. Ji, J. Qiu, T. Takagi, T. Uchimoto, and N. Hu, "Role of interlaminar interface on bulk conductivity and electrical anisotropy of CFRP laminates measured by eddy current method," *NDT & E International*, vol. 68, 2014.
- [29] X. Gros, K. Ogi, and K. Takahashi, "Eddy current, ultrasonic C-scan and scanning acoustic microscopy testing of delaminated quasi-isotropic CFRP materials: a case study," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 17, 1998.
- [30] K. Mizukami, Y. Mizutani, A. Todoroki, and Y. Suzuki, "Design of eddy current-based dielectric constant meter for defect detection in glass fiber reinforced plastics," *NDT & E International*, vol. 74, 2015.
- [31] K. Mizukami, Y. Mizutani, A. Todoroki, and Y. Suzuki, "Detection of delamination in thermoplastic CFRP welded zones using induction heating assisted eddy current testing," *NDT & E International*, vol. 74, 2015.
- [32] L. Nováková, M. Boháčová, and P. Homola, "Application of material analysis and eddy current conductivity tests to aircraft accident investigation," *Engineering Failure Analysis*, vol. 56, 2015.
- [33] J. Peng, G. Y. Tian, L. Wang, Y. Zhang, K. Li, and X. Gao, "Investigation into eddy current pulsed thermography for rolling contact fatigue detection and characterization," *NDT & E International*, vol. 74, 2015.
- [34] Y. He, G. Tian, M. Pan, and D. Chen, "Impact evaluation in carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates using eddy current pulsed thermography," *Composite Structures*, vol. 109, 2014.
- [35] K. Mizukami, Y. Mizutani, K. Kimura, A. Sato, A. Todoroki, Y. Suzuki, *et al.*, "Visualization and size estimation of fiber waviness in multidirectional CFRP laminates using eddy current imaging," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 90, 2016.

- [36] G. Bardl, A. Nocke, C. Cherif, M. Pooch, M. Schulze, H. Heuer, *et al.*, "Automated detection of yarn orientation in 3D-draped carbon fiber fabrics and preforms from eddy current data," *Composites Part B: Engineering*, vol. 96, 2016.
- [37] A. Bouloudenine, M. Feliachi, and M. E. H. Latreche, "Development of circular arrayed eddy current sensor for detecting fibers orientation and in-plane fiber waviness in unidirectional CFRP," *NDT & E International*, vol. 92, 2017.
- [38] D. Berger, A. Egloff, J. Summa, M. Schwarz, G. Lanza, and H.-G. Herrmann, "Conception of an Eddy Current In-process Quality Control for the Production of Carbon Fibre Reinforced Components in the RTM Process Chain," *Procedia CIRP*, vol. 62, 2017.
- [39] M. P. De Goeje and K. E. D. Wapenaar, "Non-destructive inspection of carbon fibre-reinforced plastics using eddy current methods," *Composites*, vol. 23, 1992.
- [40] C. Sklarczyk, "Microwave, millimeter wave and terahertz (MMT) techniques for materials characterization," in *Materials Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods*, I. A. Gerhard Huebschen, Ralf Tschuncky, Hans-Georg Herrmann, Ed., ed: Woodhead Publishing, 2016, p. 125.
- [41] R. F. Anastasi, "Investigation of fiber waviness in a thick glass composite beam using THz NDE," in *15th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, 2008.
- [42] C.-H. Ryu, S.-H. Park, D.-H. Kim, K.-Y. Jhang, and H.-S. Kim, "Nondestructive evaluation of hidden multi-delamination in a glass-fiber-reinforced plastic composite using terahertz spectroscopy," *Composite Structures*, vol. 156, 2015.
- [43] A. Redo-Sanchez, N. Karpowicz, J. Xu, and X. Zhang, "Damage and defect inspection with terahertz waves," in *4th International Workshop on Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization*, Dartmouth, USA, 2006.
- [44] K. Naito, Y. Kagawa, S. Utsuno, T. Naganuma, and K. Kurihara, "Dielectric properties of eight-harness-stain fabric glass fiber reinforced polyimide matrix composite in the THz frequency range," *NDT & E International*, vol. 42, 2009.
- [45] M. J. Bohn and D. T. Petkie, "18 - Terahertz applications in the aerospace industry A2 - Saeedkia, Daryoosh," in *Handbook of Terahertz Technology for Imaging, Sensing and Communications*, D. Saeedkia, Ed., ed: Woodhead Publishing, 2013, pp. 510-546.
- [46] C. Stoik, M. Bohn, and J. Blackshire, "Nondestructive evaluation of aircraft composites using reflective terahertz time domain spectroscopy," *NDT & E International*, vol. 43, 2010.
- [47] D. K. Hsu, K.-S. Lee, J.-W. Park, Y.-D. Woo, and K.-H. Im, "NDE inspection of terahertz waves in wind turbine composites," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 13, 2012.
- [48] P. B. Nagy, "Fatigue damage assessment by nonlinear ultrasonic materials characterization," *Ultrasonics*, vol. 36, 1998.
- [49] E. Koen and A. Van Den Abeele, "Elastic pulsed wave propagation in media with second-or higher-order nonlinearity. Part I. Theoretical framework," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 99, 1996.
- [50] K. E. Van Den Abeele, A. Sutin, J. Carmeliet, and P. A. Johnson, "Micro-damage diagnostics using nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS)," *NDT & E International*, vol. 34, 2001.
- [51] I. Y. Solodov, N. Krohn, and G. Busse, "CAN: an example of nonclassical acoustic nonlinearity in solids," *Ultrasonics*, vol. 40, 2002.
- [52] D. Donskoy, A. Sutin, and A. Ekimov, "Nonlinear acoustic interaction on contact interfaces and its use for nondestructive testing," *NDT & E International*, vol. 34, 2001.
- [53] K.-A. Van Den Abeele, P. A. Johnson, and A. Sutin, "Nonlinear elastic wave spectroscopy (NEWS) techniques to discern material damage, part I: nonlinear wave modulation spectroscopy (NWMS)," *Research in nondestructive evaluation*, vol. 12, 2000.

- [54] A. Klepka, W. Staszewski, R. Jenal, M. Szewdo, J. Iwaniec, and T. Uhl, "Nonlinear acoustics for fatigue crack detection—experimental investigations of vibro-acoustic wave modulations," *Structural Health Monitoring*, vol. 11, 2012.
- [55] A. Klepka, L. Pieczonka, W. Staszewski, and F. Aymerich, "Impact damage detection in laminated composites by non-linear vibro-acoustic wave modulations," *Composites Part B: Engineering*, vol. 65, 2014.
- [56] F. Aymerich and W. Staszewski, "Experimental study of impact-damage detection in composite laminates using a cross-modulation vibro-acoustic technique," *Structural Health Monitoring*, vol. 9, 2010.
- [57] V. Y. Zaitsev, V. Gusev, and B. Castagnede, "Observation of the “Luxemburg–Gorky effect” for elastic waves," *Ultrasonics*, vol. 40, 2002.
- [58] B. Korshak, I. Y. Solodov, and E. Ballad, "DC effects, sub-harmonics, stochasticity and “memory” for contact acoustic non-linearity," *Ultrasonics*, vol. 40, 2002.
- [59] T. Ulrich, A. Sutin, R. Guyer, and P. Johnson, "Time reversal and non-linear elastic wave spectroscopy (TR NEWS) techniques," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 43, 2008.
- [60] T. Goursolle, S. Dos Santos, O. B. Matar, and S. Calle, "Non-linear based time reversal acoustic applied to crack detection: Simulations and experiments," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 43, 2008.
- [61] M. Meo and G. Zumpano, "Nonlinear elastic wave spectroscopy identification of impact damage on a sandwich plate," *Composite Structures*, vol. 71, 2005.
- [62] I. Solodov, J. Bai, S. Bekgulyan, and G. Busse, "A local defect resonance to enhance acoustic wave-defect interaction in ultrasonic nondestructive evaluation," *Applied Physics Letters*, vol. 99, 2011.
- [63] I. Solodov, "Resonant acoustic nonlinearity of defects for highly-efficient nonlinear NDE," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 33, 2014.
- [64] S. Delrue, M. Tabatabaeipour, J. Hettler, and K. Van Den Abeele, "Non-Destructive Evaluation of Kissing Bonds using Local Defect Resonance (LDR) Spectroscopy: A Simulation Study," *Physics Procedia*, vol. 70, 2015.
- [65] F. Aymerich and W. Staszewski, "Impact damage detection in composite laminates using nonlinear acoustics," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, 2010.
- [66] H. Rolland, N. Saintier, P. Wilson, J. Merzeau, and G. Robert, "In situ X-ray tomography investigation on damage mechanisms in short glass fibre reinforced thermoplastics: Effects of fibre orientation and relative humidity," *Composites Part B: Engineering*, vol. 109, 2017.
- [67] S. Gholizadeh, "A review of non-destructive testing methods of composite materials," *Procedia Structural Integrity*, vol. 1, 2016.
- [68] R. Prakash, "Non-destructive testing of composites," *Composites*, vol. 11, 1980.
- [69] F. Guild, N. Vrellos, B. Drinkwater, N. Balhi, S. Ogin, and P. Smith, "Intra-laminar cracking in CFRP laminates: observations and modelling," *Journal of Materials Science*, vol. 41, 2006.
- [70] A. E. Scott, M. Mavrogordato, P. Wright, I. Sinclair, and S. M. Spearing, "In situ fibre fracture measurement in carbon–epoxy laminates using high resolution computed tomography," *Composites Science and Technology*, vol. 71, 2011.
- [71] S. C. Garcea, I. Sinclair, and S. M. Spearing, "In situ synchrotron tomographic evaluation of the effect of toughening strategies on fatigue micromechanisms in carbon fibre reinforced polymers," *Composites Science and Technology*, vol. 109, 2015.
- [72] S. C. Garcea, M. N. Mavrogordato, A. E. Scott, I. Sinclair, and S. M. Spearing, "Fatigue micromechanism characterisation in carbon fibre reinforced polymers using synchrotron radiation computed tomography," *Composites Science and Technology*, vol. 99, 2014.

- [73] H. Rolland, N. Saintier, and G. Robert, "Damage mechanisms in short glass fibre reinforced thermoplastic during in situ microtomography tensile tests," *Composites Part B: Engineering*, vol. 90, 2016.
- [74] B. Yu, R. Blanc, C. Soutis, and P. Withers, "Evolution of damage during the fatigue of 3D woven glass-fibre reinforced composites subjected to tension–tension loading observed by time-lapse X-ray tomography," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 82, 2016.
- [75] F. Cosmi and C. Ravalico, "Threshold identification for micro-tomographic damage characterisation in a short-fibre-reinforced polymer," *Strain*, vol. 51, 2015.
- [76] B. Yu, R. Bradley, C. Soutis, and P. Withers, "A comparison of different approaches for imaging cracks in composites by X-ray microtomography," *Phil. Trans. R. Soc. A*, vol. 374, 2016.
- [77] F. Sket, A. Enfedaque, C. Alton, C. González, J. M. Molina-Aldareguia, and J. Llorca, "Automatic quantification of matrix cracking and fiber rotation by X-ray computed tomography in shear-deformed carbon fiber-reinforced laminates," *Composites Science and Technology*, vol. 90, 2014.
- [78] F. Hild, A. Bouterf, and S. Roux, "Damage measurements via DIC," *International Journal of Fracture*, vol. 191, 2015.
- [79] A. Todoroki and J. Yoshida, "Electrical resistance change of unidirectional CFRP due to applied load," *JSME International Journal Series A*, vol. 47, 2004.
- [80] A. Todoroki, M. Tanaka, and Y. Shimamura, "Measurement of orthotropic electric conductance of CFRP laminates and analysis of the effect on delamination monitoring with an electric resistance change method," *Composites Science and Technology*, vol. 62, 2002.
- [81] S. A. Hayes, A. D. Lafferty, G. Altinkurt, P. R. Wilson, M. Collinson, and P. Duchene, "Direct electrical cure of carbon fiber composites," *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, vol. 1, 2015.
- [82] M. Gigliotti, M. C. Lafarie-Frenot, Y. Lin, and A. Pugliese, "Electro-mechanical fatigue of CFRP laminates for aircraft applications," *Composite Structures*, vol. 127, 2015.
- [83] N. Angelidis, C. Y. Wei, and P. E. Irving, "The electrical resistance response of continuous carbon fibre composite laminates to mechanical strain," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 35, 2004.
- [84] M. Kupke, K. Schulte, and R. Schüler, "Non-destructive testing of FRP by d.c. and a.c. electrical methods," *Composites Science and Technology*, vol. 61, 2001.
- [85] M. T. Connor, S. Roy, T. A. Ezquerra, and F. J. B. Calleja, "Broadband AC conductivity of conductor-polymer composites," *Physical Review B*, vol. 57, 1998.
- [86] J. C. Abry, Y. K. Choi, A. Chateauminois, B. Dalloz, G. Giraud, and M. Salvia, "In-situ monitoring of damage in CFRP laminates by means of AC and DC measurements," *Composites Science and Technology*, vol. 61, 2001.
- [87] A. Todoroki, Y. Tanaka, and Y. Shimamura, "Delamination monitoring of graphite/epoxy laminated composite plate of electric resistance change method," *Composites Science and Technology*, vol. 62, 2002.
- [88] A. Todoroki and Y. Tanaka, "Delamination identification of cross-ply graphite/epoxy composite beams using electric resistance change method," *Composites Science and Technology*, vol. 62, 2002.
- [89] Y. Suzuki, A. Todoroki, R. Matsuzaki, and Y. Mizutani, "Impact-damage visualization in CFRP by resistive heating: Development of a new detection method for indentations caused by impact loads," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, 2012.
- [90] A. Todoroki, K. Omagari, Y. Shimamura, and H. Kobayashi, "Matrix crack detection of CFRP using electrical resistance change with integrated surface probes," *Composites Science and Technology*, vol. 66, 2006.

- [91] R. Schueler, S. P. Joshi, and K. Schulte, "Damage detection in CFRP by electrical conductivity mapping," *Composites Science and Technology*, vol. 61, 2001.
- [92] K. Schulte and C. Baron, "Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements," *Composites Science and Technology*, vol. 36, 1989.
- [93] A. Vavouliotis, A. Paipetis, and V. Kostopoulos, "On the fatigue life prediction of CFRP laminates using the electrical resistance change method," *Composites Science and Technology*, vol. 71, 2011.
- [94] C. Tamiatto, P. Krawczak, J. Pabiot, and F. Laurent, "Integrated sensors for in-service health monitoring of glass/resin composites," *Journal of Advanced Materials*, vol. 30, 1998.
- [95] C. Tamiatto, P. Krawczak, J. Pabiot, and F. Laurent, "Smart Composites applied to continuous in-service damage monitoring of glass/polymer industrial parts," *SME Technical Paper*, 2000.
- [96] J. Berthelot and J. Rhazi, "Acoustic emission in carbon fibre composites," *Composites Science and Technology*, vol. 37, 1990.
- [97] E. Z. Kordatos, K. G. Dassios, D. G. Aggelis, and T. E. Matikas, "Rapid evaluation of the fatigue limit in composites using infrared lock-in thermography and acoustic emission," *Mechanics Research Communications*, vol. 54, 2013.
- [98] H. Y. Chou, A. P. Mouritz, M. K. Bannister, and A. R. Bunsell, "Acoustic emission analysis of composite pressure vessels under constant and cyclic pressure," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 70, 2015.
- [99] S. Masmoudi, A. El Mahi, and S. Turki, "Fatigue behaviour and structural health monitoring by acoustic emission of E-glass/epoxy laminates with piezoelectric implant," *Applied Acoustics*, vol. 108, 2016.
- [100] S. Huguet, N. Godin, R. Gaertner, L. Salmon, and D. Villard, "Use of acoustic emission to identify damage modes in glass fibre reinforced polyester," *Composites Science and Technology*, vol. 62, 2002.
- [101] D. D. Doan, E. Ramasso, V. Placet, S. Zhang, L. Boubakar, and N. Zerhouni, "An unsupervised pattern recognition approach for AE data originating from fatigue tests on polymer-composite materials," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 64, 2015.
- [102] O. Skawinski, P. Hulot, C. Binétruy, and C. Rasche, "Structural integrity evaluation of CNG composite cylinders by acoustic emission monitoring," *Journal of Acoustic Emission*, vol. 26, 2008.
- [103] P. Krawczak and J. Pabiot, "Acoustic emission applied to glass fibre/organic thermosetting matrix interface characterization," *Applied Composite Materials*, vol. 1, 1994.
- [104] O. Ceysson, M. Salvia, and L. Vincent, "Damage mechanisms characterisation of carbon fibre/epoxy composite laminates by both electrical resistance measurements and acoustic emission analysis," *Scripta Materialia*, vol. 34, 1996.
- [105] S.-T. Kim and 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: A*, vol. 234, 1997.
- [106] G. Kotsikos, J. Evans, A. Gibson, and J. Hale, "Environmentally enhanced fatigue damage in glass fibre reinforced composites characterised by acoustic emission," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 31, 2000.
- [107] L. Calabrese, G. Campanella, and E. Proverbio, "Noise removal by cluster analysis after long time AE corrosion monitoring of steel reinforcement in concrete," *Construction and Building Materials*, vol. 34, 2012.
- [108] N. Godin, S. Huguet, and 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," *NDT & E International*, vol. 38, 2005.
- [109] E. Pomponi and A. Vinogradov, "A real-time approach to acoustic emission clustering," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 40, 2013.

- [110] M. Kharrat, V. Placet, E. Ramasso, and M. L. Boubakar, "Influence of damage accumulation under fatigue loading on the AE-based health assessment of composite materials: Wave distortion and AE-features evolution as a function of damage level," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2016.
- [111] A. Marec, J. H. Thomas, and 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, 2008.
- [112] R. De Oliveira, C. Ramos, and A. Marques, "Applications of the wavelet transform to the modal analysis of clustered AE waveforms," *Smart Structures and Systems*, submitted for publication, 2006.
- [113] M. G. Baxter, R. Pullin, K. M. Holford, and S. L. Evans, "Delta T source location for acoustic emission," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, 2007.
- [114] M. J. Eaton, R. Pullin, and K. M. Holford, "Acoustic emission source location in composite materials using Delta T Mapping," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 43, 2012.
- [115] S. K. Al-Jumaili, K. M. Holford, M. J. Eaton, and R. Pullin, "Parameter Correction Technique (PCT): A novel method for acoustic emission characterisation in large-scale composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 75, 2015.
- [116] D. Crivelli, M. Guagliano, M. Eaton, M. Pearson, S. Al-Jumaili, K. Holford, *et al.*, "Localisation and identification of fatigue matrix cracking and delamination in a carbon fibre panel by acoustic emission," *Composites Part B: Engineering*, vol. 74, 2015.
- [117] V. P. Vavilov and D. D. Burleigh, "Review of pulsed thermal NDT: Physical principles, theory and data processing," *NDT & E International*, vol. 73, 2015.
- [118] C. Meola and G. M. Carlomagno, "Infrared thermography to evaluate impact damage in glass/epoxy with manufacturing defects," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 67, 2014.
- [119] C. Colombo, L. Vergani, and M. Burman, "Static and fatigue characterisation of new basalt fibre reinforced composites," *Composite structures*, vol. 94, 2012.
- [120] W. Harizi, S. Chaki, G. Bourse, and M. Ourak, "Mechanical damage assessment of glass fiber-reinforced polymer composites using passive infrared thermography," *Composites Part B: Engineering*, vol. 59, 2014.
- [121] G. La Rosa and A. Risitano, "Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components," *International Journal of Fatigue*, vol. 22, 2000.
- [122] J. Montesano, Z. Fawaz, and H. Bougherara, "Use of infrared thermography to investigate the fatigue behavior of a carbon fiber reinforced polymer composite," *Composite Structures*, vol. 97, 2013.
- [123] L. Jegou, Y. Marco, V. Le Saux, and S. Calloch, "Fast prediction of the Wöhler curve from heat build-up measurements on short fiber reinforced plastic," *International Journal of Fatigue*, vol. 47, 2013.
- [124] R. Steinberger, T. V. Leitão, E. Ladstätter, G. Pinter, W. Billinger, and R. Lang, "Infrared thermographic techniques for non-destructive damage characterization of carbon fibre reinforced polymers during tensile fatigue testing," *International Journal of Fatigue*, vol. 28, 2006.
- [125] R. K. Fruehmann, J. M. Dulieu-Barton, and S. Quinn, "Assessment of fatigue damage evolution in woven composite materials using infra-red techniques," *Composites Science and Technology*, vol. 70, 2010.
- [126] P. Cawley, "Inspection of composites—current status and challenges," in *Proc. European Conference of Nondestructive Testing*, London, UK, 2006.

- [127] D. Chen, N. Wu, and Z. Zhang, "Defect Recognition in Thermosonic Imaging," *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 25, 2012.
- [128] B. Hosten, C. Biateau, C. Bacon, C. Pradère, J.-C. Batsale, and A. Meziane, "Sonothermography in composite materials: Finite Element modeling and experimental validation," *NDT & E International*, vol. 51, 2012.
- [129] C. Meola and G. M. Carlomagno, "Impact damage in GFRP: new insights with infrared thermography," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, 2010.
- [130] S. G. Zacharia, A. Siddiqui, and J. Lahiri, "In situ thermal diffusivity determination of anisotropic composite structures: Transverse diffusivity measurement," *NDT & E International*, vol. 48, 2012.
- [131] N. Rajic, "Principal component thermography for flaw contrast enhancement and flaw depth characterisation in composite structures," *Composite Structures*, vol. 58, 2002.
- [132] V. Vavilov, "Determining limits of thermal NDT of thick graphite/epoxy composites," in *9th European Conference on Nondestructive Testing, Berlin, Germany*, 2006.
- [133] Y. Li, Z.-w. Yang, J.-t. Zhu, A.-b. Ming, W. Zhang, and J.-y. Zhang, "Investigation on the damage evolution in the impacted composite material based on active infrared thermography," *NDT & E International*, vol. 83, 2016.
- [134] C. Meola, G. M. Carlomagno, A. Squillace, and A. Vitiello, "Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography," *Engineering Failure Analysis*, vol. 13, 2006.
- [135] L. Junyan, L. Yang, W. Fei, and W. Yang, "Study on probability of detection (POD) determination using lock-in thermography for nondestructive inspection (NDI) of CFRP composite materials," *Infrared Physics & Technology*, vol. 71, 2015.
- [136] G. Jinlong, L. Junyan, W. Fei, and W. Yang, "Inverse heat transfer approach for nondestructive estimation the size and depth of subsurface defects of CFRP composite using lock-in thermography," *Infrared Physics & Technology*, vol. 71, 2015.
- [137] C. Meola, R. Di Maio, N. Roberti, and G. M. Carlomagno, "Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures," *Engineering Failure Analysis*, vol. 12, 2005.
- [138] W. Harizi, S. Chaki, G. Bourse, and M. Ourak, "Mechanical damage assessment of polymer–matrix composites using active infrared thermography," *Composites Part B: Engineering*, vol. 66, 2014.
- [139] T. Cinzia, M. Carosena, and C. G. Maria, "Porosity distribution in composite structures with infrared thermography," *Journal of Composites*, vol. 2013, 2013.
- [140] A. P. Chrysafi, N. Athanasopoulos, and N. J. Siakavellas, "Damage detection on composite materials with active thermography and digital image processing," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 116, 2017.
- [141] M. Mahal, T. Blanksvärd, B. Täljsten, and G. Sas, "Using digital image correlation to evaluate fatigue behavior of strengthened reinforced concrete beams," *Engineering Structures*, vol. 105, 2015.
- [142] N. Tableau, Z. Aboura, K. Khellil, L. Marcin, and F. Bouillon, "Accurate measurement of in-plane and out-of-plane shear moduli on 3D woven SiC-SiBC material," *Composite Structures*, vol. 172, 2017.
- [143] T. Franz, "Photoelastic study of the mechanic behaviour of orthotropic composite plates subjected to impact," *Composite Structures*, vol. 54, 2001.
- [144] B. Chen and C. Basaran, "Far-field modeling of Moiré interferometry using scalar diffraction theory," *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 50, 2012.
- [145] R. Lammering, "Observation of piezoelectrically induced Lamb wave propagation in thin plates by use of speckle interferometry," *Experimental mechanics*, vol. 50, 2010.

- [146] A. Ayadi, H. Nouri, S. Guessasma, and F. Roger, "Large-scale X-Ray microtomography analysis of fiber orientation in weld line of short glass fiber reinforced thermoplastic and related elasticity behavior," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 301, 2016.
- [147] M. L. Aparna, G. Chaitanya, K. Srinivas, and J. A. Rao, "Fatigue testing of continuous GFRP composites using digital image correlation (DIC) technique: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 2, 2015.
- [148] A. J. Comer, K. B. Katnam, W. F. Stanley, and T. M. Young, "Characterising the behaviour of composite single lap bonded joints using digital image correlation," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 40, 2013.
- [149] S. Giancane, F. W. Panella, R. Nobile, and V. Dattoma, "Fatigue damage evolution of fiber reinforced composites with digital image correlation analysis," *Procedia Engineering*, vol. 2, 2010.
- [150] J. Montesano, M. Selezneva, M. Levesque, and Z. Fawaz, "Modeling fatigue damage evolution in polymer matrix composite structures and validation using in-situ digital image correlation," *Composite Structures*, vol. 125, 2015.
- [151] T. Brynk, R. M. Molak, M. Janiszewska, and Z. Pakiel, "Digital Image Correlation measurements as a tool of composites deformation description," *Computational Materials Science*, vol. 64, 2012.
- [152] V. Crupi, E. Guglielmino, G. Risitano, and F. Tavilla, "Experimental analyses of SFRP material under static and fatigue loading by means of thermographic and DIC techniques," *Composites Part B: Engineering*, vol. 77, 2015.
- [153] M. Y. Dehnavi, S. Khaleghian, A. Emami, M. Tehrani, and N. Soltani, "Utilizing digital image correlation to determine stress intensity factors," *Polymer Testing*, vol. 37, 2014.
- [154] V. K. Kinra, A. S. Ganpatye, and K. Maslov, "Ultrasonic ply-by-ply detection of matrix cracks in laminated composites," *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 25, 2006.
- [155] W. Harizi, S. Chaki, G. Bourse, and M. Ourak, "Mechanical damage characterization of glass fiber-reinforced polymer laminates by ultrasonic maps," *Composites Part B: Engineering*, vol. 70, 2015.
- [156] C. W. Lawrence, G. A. D. Briggs, C. B. Scruby, and J. R. R. Davies, "Acoustic microscopy of ceramic-fibre composites," *Journal of Materials Science*, vol. 28, 1993.
- [157] I. Kimpara, M. Takehana, and T. Suzuki, "Analysis of thickness-direction ultrasonic wave propagation of fiberglass reinforced plastics laminates," in *ICCM/2; Proceedings of the Second International Conference on Composite Materials, Toronto, Canada, April 16-20, 1978*.
- [158] K. K. Borum, "Evaluation of the quality of thick fibre composites using immersion and air-coupled ultrasonic techniques," in *Proceedings of European Conference on Non-destructive Testing*, Berlin, 2006.
- [159] G. Hawkins, P. Sheaffer, and E. Johnson, "NDE of thick composites in the aerospace industry—an overview," in *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, D. E. C. Donald O. Thompson, Ed., ed: Springer, 1991, pp. 1591-1597.
- [160] D. K. Hsu and D. J. Barnard, "Inspecting composites with airborne ultrasound: through thick and thin," in *Proceedings of Quantitative nondestructive evaluation*, 2006.
- [161] G. M. Revel, G. Pandarese, and A. Cavuto, "Advanced ultrasonic non-destructive testing for damage detection on thick and curved composite elements for constructions," *Journal of Sandwich Structures and Materials*, vol. 15, 2013.
- [162] K. Diamanti and C. Soutis, "Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 46, 2010.
- [163] N. Toyama, S. Yashiro, J. Takatsubo, and T. Okabe, "Stiffness evaluation and damage identification in composite beam under tension using Lamb waves," *Acta Materialia*, vol. 53, 2005.

- [164] Z. Su, L. Ye, and Y. Lu, "Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 295, 2006.
- [165] C. Ramadas, J. Padiyar, K. Balasubramaniam, M. Joshi, and C. Krishnamurthy, "Lamb wave based ultrasonic imaging of interface delamination in a composite T-joint," *NDT & E International*, vol. 44, 2011.
- [166] C. Ramadas, A. Hood, I. Khan, K. Balasubramaniam, and M. Joshi, "Transmission and reflection of the fundamental Lamb modes in a metallic plate with a semi-infinite horizontal crack," *Ultrasonics*, vol. 53, 2013.
- [167] M. Rheinforth, F. Schmidt, D. Döring, I. Solodov, G. Busse, and P. Horst, "Air-coupled guided waves combined with thermography for monitoring fatigue in biaxially loaded composite tubes," *Composites Science and Technology*, vol. 71, 2011.
- [168] G. Mayr, B. Plank, J. Sekelja, and G. Hendorfer, "Active thermography as a quantitative method for non-destructive evaluation of porous carbon fiber reinforced polymers," *NDT & E International*, vol. 44, 2011.
- [169] V. Dattoma and S. Giancane, "Evaluation of energy of fatigue damage into GFRC through digital image correlation and thermography," *Composites Part B: Engineering*, vol. 47, 2013.
- [170] J. Cuadra, P. A. Vanniamparambil, K. Hazeli, I. Bartoli, and A. Kotsos, "Damage quantification in polymer composites using a hybrid NDT approach," *Composites Science and Technology*, vol. 83, 2013.
- [171] C. Goidescu, H. Weleman, C. Garnier, M. Fazzini, R. Brault, E. Péronnet, *et al.*, "Damage investigation in CFRP composites using full-field measurement techniques: Combination of digital image stereo-correlation, infrared thermography and X-ray tomography," *Composites Part B: Engineering*, vol. 48, 2013.
- [172] S. Chaki, W. Harizi, G. Bourse, and M. Ourak, "Multi-technique approach for non destructive diagnostic of structural composite materials using bulk ultrasonic waves, guided waves, acoustic emission and infrared thermography," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 78, 2015.
- [173] W. Harizi, "Caractérisation de l'endommagement des composites à matrice polymère par une approche multi-technique non destructive," PhD Thesis, Mines Douai and Univ. Valenciennes, 2012.
- [174] S. Chaki, W. Harizi, P. Krawczak, G. Bourse, and M. Ourak, "Structural health of polymer composite: Non destructive diagnosis using a hybrid NDT approach," *JEC Composite Mag.*, vol. 107, 2016.
- [175] A. Marec, J.-H. Thomas, and R. El Guerjouma, "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," PhD Thesis, Laboratoire d'Acoustique de L'université du Mans, 2008.
- [176] J.-Y. Zhang, W. Xu, W. Zhang, X. Meng, and Y. Zhang, "A novel compression algorithm for infrared thermal image sequence based on K-means method," *Infrared Physics & Technology*, vol. 64, 2014.
- [177] G. Shafer, *A mathematical theory of evidence* vol. 1: Princeton university press Princeton, 1976.
- [178] X. Gros, J. Bousigue, and K. Takahashi, "NDT data fusion at pixel level," *NDT & E International*, vol. 32, 1999.
- [179] A. P. Dempster, "Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping," *The annals of mathematical statistics*, 1967.
- [180] R. R. Yager, "On the dempster-shafer framework and new combination rules," *Information Sciences*, vol. 41, 1987.

- [181] J. Moysan, A. Durocher, C. Gueudré, and G. Corneloup, "Improvement of the non-destructive evaluation of plasma facing components by data combination of infrared thermal images," *NDT & E International*, vol. 40, 2007.
- [182] M.-A. Ploix, V. Garnier, D. Breysse, and J. Moysan, "NDE data fusion to improve the evaluation of concrete structures," *NDT & E International*, vol. 44, 2011.
- [183] F. Delmotte, "Un nouvel opérateur de fusion adaptatif," *Traitement du Signal*, vol. 17, 2000.
- [184] M. Rombaut and Y. Min Zhu, "Study of Dempster–Shafer theory for image segmentation applications," *Image and Vision Computing*, vol. 20, 2002.
- [185] Q. Zhou, H. Zhou, Q. Zhou, F. Yang, L. Luo, and T. Li, "Structural damage detection based on posteriori probability support vector machine and Dempster–Shafer evidence theory," *Applied Soft Computing*, vol. 36, 2015.
- [186] C. Okoh, R. Roy, J. Mehnen, and L. Redding, "Overview of Remaining Useful Life Prediction Techniques in Through-life Engineering Services," *Procedia CIRP*, vol. 16, 2014.
- [187] C. Okoh, R. Roy, and J. Mehnen, "Predictive Maintenance Modelling for Through-Life Engineering Services," *Procedia CIRP*, vol. 59, 2017.
- [188] M. Baptista, "Remaining Useful Life Estimation in Aeronautics: Combining data-driven and Kalman filtering," *Reliability Engineering & System Safety*, 2018.
- [189] H. El Kadi and Y. Al-Assaf, "Prediction of the fatigue life of unidirectional glass fiber/epoxy composite laminae using different neural network paradigms," *Composite Structures*, vol. 55, 2002.
- [190] Y. Al-Assaf and H. El Kadi, "Fatigue life prediction of unidirectional glass fiber/epoxy composite laminae using neural networks," *Composite Structures*, vol. 53, 2001.
- [191] Z. Zhang and K. Friedrich, "Artificial neural networks applied to polymer composites: a review," *Composites Science and Technology*, vol. 63, 2003.
- [192] W. Sha and K. L. Edwards, "The use of artificial neural networks in materials science based research," *Materials & Design*, vol. 28, 2007.
- [193] Y. Al-Assaf and H. E. Kadi, "Fatigue life prediction of composite materials using polynomial classifiers and recurrent neural networks," *Composite Structures*, vol. 77, 2007.
- [194] J. A. Lee, D. P. Almond, and B. Harris, "The use of neural networks for the prediction of fatigue lives of composite materials," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 30, 1999.
- [195] Z. M. Sbartai, S. Laurens, S. M. Elachachi, and C. Payan, "Concrete properties evaluation by statistical fusion of NDT techniques," *Construction and Building Materials*, vol. 37, 2012.
- [196] F. X. Irisarri, A. Lasseigne, F. H. Leroy, and R. Le Riche, "Optimal design of laminated composite structures with ply drops using stacking sequence tables," *Composite Structures*, vol. 107, 2014.
- [197] H. A. Deveci and H. S. Artem, "Optimum design of fatigue-resistant composite laminates using hybrid algorithm," *Composite Structures*, vol. 168, 2017.
- [198] J. Krapez, D. Pacou, and G. Gardette, "Lock-in thermography and fatigue limit of metals," *OFFICE NATIONAL D ETUDES ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES ONERA-PUBLICATIONS-TP*, 2000.
- [199] V. Crupi, "An Unifying Approach to assess the structural strength," *International Journal of Fatigue*, vol. 30, 2008.
- [200] J. Payan, "Etude du comportement de composites stratifiés sous chargement statique et de fatigue," PhD Thesis, Université de la Méditerranée-Aix-Marseille II, 2004.
- [201] Z. Su, C. Zhou, M. Hong, L. Cheng, Q. Wang, and X. Qing, "Acousto-ultrasonics-based fatigue damage characterization: Linear versus nonlinear signal features," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 45, 2014.

- [202] E. Maillet, N. Godin, M. R'Mili, P. Reynaud, G. Fantozzi, and J. Lamon, "Real-time evaluation of energy attenuation: A novel approach to acoustic emission analysis for damage monitoring of ceramic matrix composites," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 34, 2014.

**Résumé :**

Ce travail de recherche consiste en la proposition d'une nouvelle approche de caractérisation non destructive de l'endommagement des matériaux composites (carbone/époxy) sollicités en fatigue par des essais d'auto-échauffement (blocs de chargements croissants). Cette approche est basée sur l'utilisation de plusieurs techniques non destructives appliquées in-situ, en temps réel ou différé, dont l'analyse est, soit redondante soit complémentaire. Au total, six techniques ont été utilisées (émission acoustique, thermographie infrarouge, corrélation d'images numériques, acousto-ultrasons, ultrasons C-scan et ondes de Lamb) et leurs résultats post-traités puis fusionnés à l'aide d'algorithmes basés sur les réseaux de neurones. Les résultats obtenus ont permis d'évaluer et de localiser l'endommagement du matériau et d'estimer sa durée de vie résiduelle. Ce faisant, plusieurs avancés scientifiques ont été obtenus en réalisant, par exemple, une localisation 2D des évènements acoustiques à l'aide seulement de deux capteurs avec une précision millimétrique, ou encore le développement d'une nouvelle technique imagée d'acousto-ultrasons permettant un contrôle hors contraintes de l'état d'endommagement du matériau, ...et enfin, le pronostic de la durée de vie résiduelle du matériau basé sur une fusion de données par réseaux de neurones.

**Abstract :**

This research work consists in a new approach for non-destructive characterisation of damage in composite materials (carbon/epoxy) subjected to fatigue during self-heating tests (increasing load blocks). This approach is based on the use of several non-destructive techniques applied in-situ, in real time or delayed, whose analysis is either redundant or complementary. Six techniques were used (acoustic emission, infrared thermography, digital image correlation, acousto-ultrasound, C-scan ultrasound and lamb waves) and their post-processed results were merged using algorithms based on neural networks. The results obtained made it possible to assess and locate the damage of the material and to estimate its residual life. In doing so, several scientific advances have been obtained by, for example, carrying out a 2D localization of acoustic events using only two sensors with millimetric precision, or the development of a new pictorial acousto-ultrasonic technique allowing an control of the state of material damage at free stress conditions, ... and finally, the prognosis of the residual lifetime of the material based on a data fusion by neural networks.