

# **ETUDE DE L'ENDOMMAGEMENT DE MATERIAUX COMPOSITES A FIBRES DE CARBONE PAR EMISSION ACOUSTIQUE**



**Etudiants :**

**Agathe DUVAL**

**Céline LEDUC**

**Louise SANDOVAL**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Benoit VIEILLE**

*Cette page est laissée intentionnellement vierge.*

Date de remise du rapport : 17/06/2013

Référence du projet : STPI/P6/2013 – N°32

Intitulé du projet : *Etude de l'endommagement de matériaux composites à fibres de carbone par émission acoustique*

Type de projet : *Expérimentation, bibliographie*

Objectifs du projet :

*Ce projet a pour but l'étude et la compréhension d'une méthode de détection d'endommagement des matériaux : l'émission acoustique.*

*Avec l'application au carbone époxy, lors d'essais de traction, l'objectif est de comprendre les phénomènes mis en jeu lors de l'utilisation de cette technique. L'étude des différents graphiques et courbes, issus des expériences, doit permettre de dégager des conclusions quant aux mécanismes d'endommagement ayant lieu au sein du matériau à l'essai.*

Mots-clefs du projet :

- *Endommagement*
- *Traction*
- *Emission Acoustique*

## TABLE DES MATIERES

1	Introduction .....	6
2	Méthodologie / Organisation du travail .....	7
3	Travail réalisé et résultats .....	8
3.1	Matériaux composites .....	8
3.1.1	Généralités.....	8
3.1.2	Carbone époxy.....	9
3.2	Résistance des matériaux .....	10
3.2.1	Généralités.....	10
3.2.2	Traction simple.....	13
3.3	Emission acoustique .....	15
3.3.1	Le principe physique du contrôle non destructif par émission acoustique.....	15
3.3.2	Le signal et les systèmes de traitement actuels.....	16
3.3.3	Traitement du signal : les techniques les plus utilisées.....	18
3.3.4	Les principales applications liées à l'EA .....	19
3.3.5	Les avantages et les limites de cette technique.....	20
3.4	Expériences .....	20
3.4.1	Carbone époxy.....	21
3.4.2	Autres matériaux.....	25
3.4.3	Comparaison.....	26
4	Conclusions et perspectives.....	28
5	Bibliographie .....	29
6	Annexes.....	31

## NOTATIONS, ACRONYMES

**RDM** : Résistance Des Matériaux

**EA** : Emission Acoustique

**MPa** : mégapascal (unité de contrainte et de pression)  
 $1 \text{ MPa} = 10^6 \text{ N.mm}^{-2}$

**QI** : Quasi-Isotropic  
orientation des plis :  $[(0^\circ, 90^\circ); (\pm 45^\circ); (0^\circ, 90^\circ); (\pm 45^\circ); (0^\circ, 90^\circ); (\pm 45^\circ); (0^\circ, 90^\circ)]$

**AP** : Angle Ply  
désigne le carbone dont l'orientation des plis est :  $[(\pm 45^\circ)_7]$

**Load-unload** : essai de traction en charge-décharge. De manière cyclique, la charge atteint un maximum avant de revenir à 0 N. Ce chargement maximum augmente à chaque cycle jusqu'à parvenir à la rupture.



## 1 INTRODUCTION

Dans le cadre du projet de P6, du 4ème semestre, nous avons mené une étude d'émission acoustique (basée sur un essai de traction) sur un matériau composite, le carbone époxy, très utilisé dans l'aéronautique.

La méthode d'émission acoustique est très répandue dans l'industrie car elle repose sur des études non destructives pour le matériau. Elle permet donc une analyse des risques et des événements survenant au sein du matériau sans arrêter la production. Toutefois, le matériel nécessaire a un coût et les résultats de ces essais doivent être analysés par des professionnels.

Nous avons donc, au travers d'essais de tractions sur divers matériaux, interprété les courbes obtenues. Chaque événement qui survient au sein du matériau a une signature acoustique particulière. L'analyse de ces signatures nous a permis de comprendre les événements mécaniques tenant place au sein du matériau. Toutefois, ces analyses effectuées demeurent une première approche, du fait de notre manque d'expérience dans le domaine et le manque de temps pour l'étude des matériaux dans le détail.

Tout d'abord, nous commencerons par une partie théorique se basant sur l'émission acoustique et les matériaux composites. Ensuite, nous aborderons les expériences effectuées durant ce projet. Nous exposerons les analyses des courbes et les conclusions que l'on a pu en tirer.



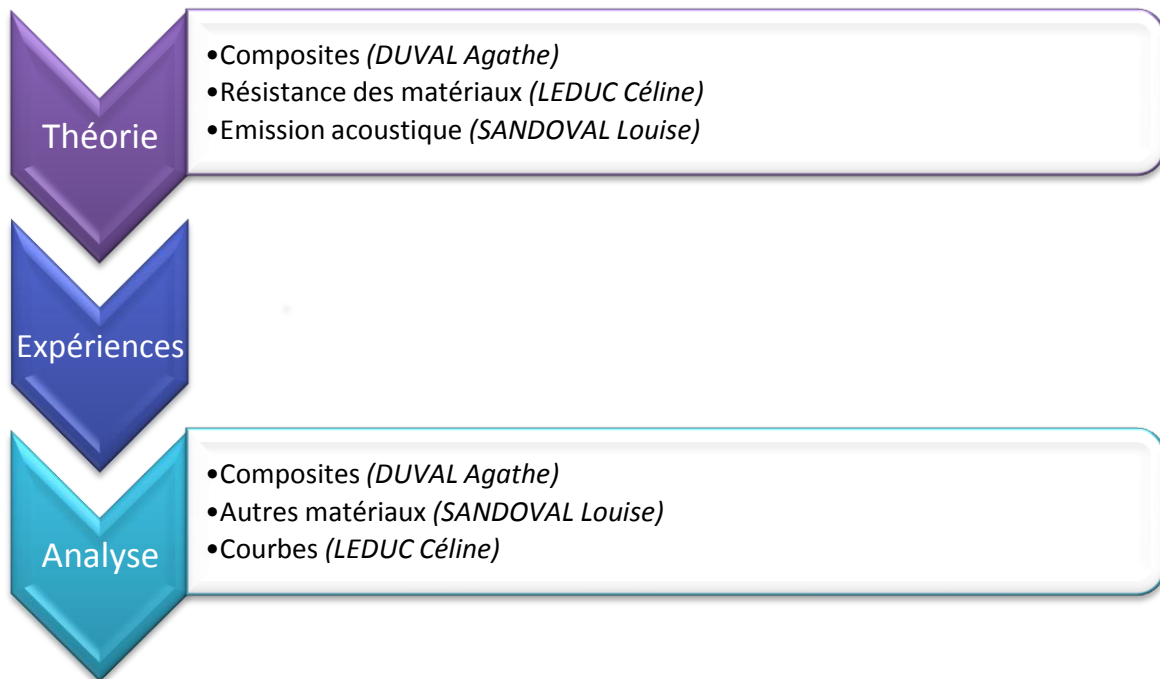
## 2 METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Ce projet a été très enrichissant pour nous. Il nous a permis de nous ouvrir à d'autres aspects de la physique notamment sur le procédé d'émission acoustique. Nous nous sommes intéressées à cette méthode, très utile et beaucoup utilisée dans les industries et entreprises. Nous avons aussi appris à travailler en groupe : répartir les tâches, discuter des problèmes rencontrés et les résoudre.

Afin que le projet se déroule sans difficultés, nous avons tout d'abord effectué des recherches générales sur le sujet : les matériaux utilisés pour les essais et la méthode d'émission acoustique en elle-même. Ces différentes recherches nous ont permis de mieux cerner le sujet et de nous aider à comprendre les expériences. Ces expériences ont été effectuées dans un laboratoire, à l'INSA. Le professeur encadrant, en charge de notre projet, a réalisé l'ensemble des tests qui vont être étudiés ci-après, les étudiants n'étant pas autorisés à mener ces expériences seuls. Ces tests, assistés par ordinateur, nous ont alors permis d'obtenir des graphiques ainsi que des séries de données.

Après avoir tracé un certain nombre de courbes et avoir analysé l'ensemble des graphiques, nous avons pu conclure.

Au niveau de la répartition de la charge de travail, chaque membre du groupe était responsable d'une partie lors des recherches générales. Une fois ce travail terminé, nous avons, toutes les trois, réfléchi et rédigé la partie expérimentale en tenant compte des expériences effectuées et des résultats obtenus.



### 3 TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

#### 3.1 Matériaux composites

##### 3.1.1 Généralités

###### 3.1.1.1 Définition

En 1992, Jean-Marie Berthelot, professeur à l'institut supérieur des matériaux et mécaniques avancées du Mans, a donné une définition générale des matériaux composites : « Un matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément ».

Un matériau composite est généralement composé d'un renfort et d'une matrice, séparés par une zone de liaison appelée interface.

Le renfort possède des propriétés mécaniques supérieures à celles de la matrice, il est le squelette supportant les efforts mécaniques, et est souvent sous forme fibreuse ou filamentaire. Les renforts peuvent notamment être classés selon leur composition (métal, verre, polymère, etc.) ou encore selon la forme et la disposition de leurs fibres.

La matrice a le rôle de liant. C'est-à-dire qu'elle assure la transmission des efforts mécaniques au renfort, le protège de l'environnement, et le maintient dans sa position initiale. On peut distinguer quatre catégories de matrices : thermodurcissables (comme l'époxy), thermoplastiques, thermostables et enfin métalliques et céramiques.

L'empilement des nappes de renforts imprégnés de résine (matrice) définit la structure du matériau. Ces couches sont également appelées plis et peuvent être unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Les nappes sont empilées de façon à optimiser la direction du renfort en fonction des charges qui lui sont imposées.

Pour les structures stratifiées à base de tissus unidirectionnels, les fibres peuvent être orientées de façon différente d'une couche à l'autre afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées. L'angle des fibres de chaque couche est ainsi donné entre crochets en partant du bas (exemple : [-45/45/-45/45/-45]).

Les matériaux composites à deux directions de renfort sont destinés à des utilisations thermostructurales (température d'utilisation de 1 000°C à 1 400°C), c'est-à-dire dans les parties chaudes des structures : moteurs d'avions ou de fusées et protections thermiques.

Il existe également des matériaux tridimensionnels, c'est-à-dire tissés selon trois directions différentes. Ce type de matériau est utilisé dans l'aérospatiale ou pour la conception de pièces complexes.

Il ne suffit pas de prendre le meilleur renfort et la meilleure matrice pour obtenir un bon matériau composite. Il est nécessaire que l'adhésion entre les fibres et la matrice soit de qualité suffisante pour que les propriétés du matériau composite obtenu soient supérieures à celles de ses constituants. Les fibres de carbone présentent une bonne adhésion avec les matrices époxy suite à un traitement oxygène.

###### 3.1.1.2 Principaux composites et leurs domaines d'application

Il existe des matériaux composites naturels et artificiels. Les principaux matériaux naturels sont le bois, qui a une matrice en lignine et un renfort en fibres de cellulose, et l'os, qui possède une matrice en collagène et un renfort en apatite. Le bois a été le premier matériau composite naturel





utilisé dans la construction, suivi par le torchis.

En ce qui concerne les composites artificiels, on constate que certains renforts sont plus utilisés pour un domaine que pour un autre. Parmi les plus utilisés, on retrouve :

	<b>Composant</b>	<b>Applications</b>
<b>Fibres</b>	Verre	Bâtiment, nautisme et autres applications non structurantes
	Carbone	Fabrication des structures, aéronautique, spatial et sports et loisirs de compétition
	Aramide (ou Kevlar)	Protections balistiques et certains réservoirs de F1
	Carbure de silicium	Applications à hautes températures et oxydantes, spatial et nucléaire
	Végétaux, lin, chanvre, polyester	Textile
<b>Matrices thermodurcissables</b>	Polyesters insaturés (et fibre de verre)	Bâtiment, nautisme et autres applications de la vie courante
	Epoxy (et fibre de carbone)	Pièces de structure et aéronautique
	Vinylester	Applications de résistance chimique
	Polyimides et polybismaleimides	Applications à moyenne et haute température (225°C - 300°C).
	Céramique et métal	Applications où une tenue de la structure à très haute température est nécessaire (jusqu'à 2200°C)

### 3.1.2 Carbone époxy

Le carbone époxy est un matériau plus léger, plus rigide et plus résistant que n'importe quel métal. C'est la raison pour laquelle il est très utilisé dans le domaine de l'aéronautique.

#### 3.1.2.1 Composition

La matrice du composite que nous étudions est un polymère époxyde (fabriqué par polymérisation), encore appelé époxy. Cette résine est un matériau thermodurcissable, c'est-à-dire qu'elle durcit sous l'effet de la chaleur. De plus, elle est très résistante à la chaleur et aux produits chimiques, et possède d'excellentes propriétés mécaniques. Dans un matériau composite, l'époxy joue le rôle de liant et permet de transporter les charges quand une fibre casse.

Cette matrice est renforcée par des fibres de carbone. Une fibre de carbone se compose de plusieurs fibres très fines allant de 5 à 15 micromètres. Ce matériau possède une faible densité ( 1,7 à 1,9 g/cm<sup>3</sup>), ce qui le rend très léger. Mais en plus de sa légèreté, la fibre de carbone est également flexible, extrêmement résistante à la traction et à la compression, à la chaleur, et aux réactions chimiques (sauf à l'oxydation).

La fabrication du carbone se fait à partir d'un précurseur (à base de polyacrylonitrile). Les fibres de ce précurseur sont d'abord oxydées, puis la carbonisation a lieu sous une atmosphère de diazote, à une température de 1000 à 1500 degrés Celsius. Ainsi, le matériau composite obtenu est à 90% de carbone. On peut rajouter une étape à la fabrication pour obtenir un matériau à 99%, mais il sera moins résistant à la traction.

Les fibres de carbone sont ensuite tissées pour former un tissu de fibres bidirectionnel. Les nappes de tissu sont imprégnées de résine (époxy) à la main, puis compressées sous vide à température ambiante. On obtient ainsi des panneaux du matériau composite souhaité.



Pour la fabrication de pièces plus complexes avec ce matériau, on utilise une autre méthode, appelée le procédé RTM (Resin Transfer Moulding). Les nappes de tissu sont découpées pour réaliser une préforme, que l'on place dans un moule fermé et que l'on met sous presse chauffante (pour accélérer la polymérisation). On fait ensuite le vide dans le moule pour éviter les bulles d'air, qui changeraient alors les propriétés mécaniques du matériau. Et finalement, on injecte la résine, qu'on laisse cuire dans le moule.

### 3.1.2.2 Éprouvettes

Une éprouvette est un morceau de composite découpé dans un tissage. La taille des éprouvettes doit respecter une norme qui varie en fonction de l'essai et du type de matériau.

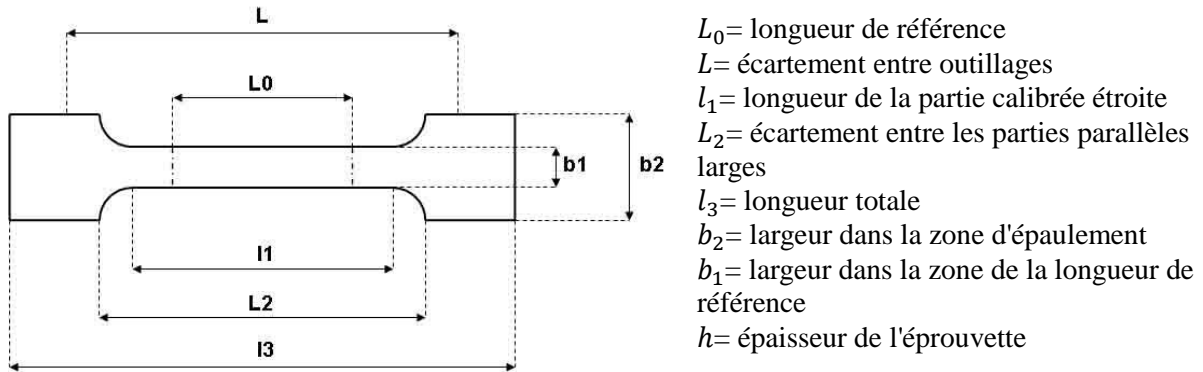


Figure 1 : forme et dimensions d'une éprouvette.

La norme que nous utilisons pour nos éprouvettes est une norme ASTM International ( American Society for Testing and Materials). ASTM International est un organisme qui rédige et produit des normes concernant les matériaux, les produits et les services. Dans notre étude, nous appliquons la norme ASTM D5083 - 10 Standard Test Method for Tensile Properties of Reinforced, qui est équivalente à la norme ISO 527 - 4 dans notre cas. C'est-à-dire que nous respectons les dimensions suivantes pour nos éprouvettes :

$$\begin{aligned}
 l_3 &\geq 150\text{mm} \\
 l_1 &= 60 \pm 0,5\text{mm} \\
 L_0 &= 50 \pm 0,5\text{mm} \\
 L &= 115 \pm 1\text{mm} \\
 h &= 2\text{à}10\text{mm} \\
 b_1 &= 10 \pm 0,2\text{mm} \\
 b_2 &= 20 \pm 0,2\text{mm}
 \end{aligned}$$

## 3.2 Résistance des matériaux

### 3.2.1 Généralités

#### 3.2.1.1 Objectifs de la RDM et principe de détermination

La résistance des matériaux est l'une des branches de la mécanique. Elle est utilisée pour prévoir comment les solides résistent et se déforment sous l'action des charges qui les sollicitent.

L'étude peut se faire de manière globale en établissant les relations entre les forces et les moments appliqués et les déplacements. L'étude du comportement local permet quant à elle de déterminer les contraintes supportées ainsi que les déformations engendrées dans les structures et leurs composantes. Les résultats permettent de prédire le comportement des solides et prévenir le risque de rupture.

Les études de RDM sont essentielles à la conception et la mise au point de nombreuses structures et machines diverses : aviation et espace, génie civil, véhicules...

Bien que les origines de la RDM remontent à Léonard de Vinci (1452-1519) et Galilée (1564-



1642), les bases scientifiques modernes n'ont été établies qu'il y a environ 300 ans par Hooke, Euler, Bernoulli ou encore Coulomb.

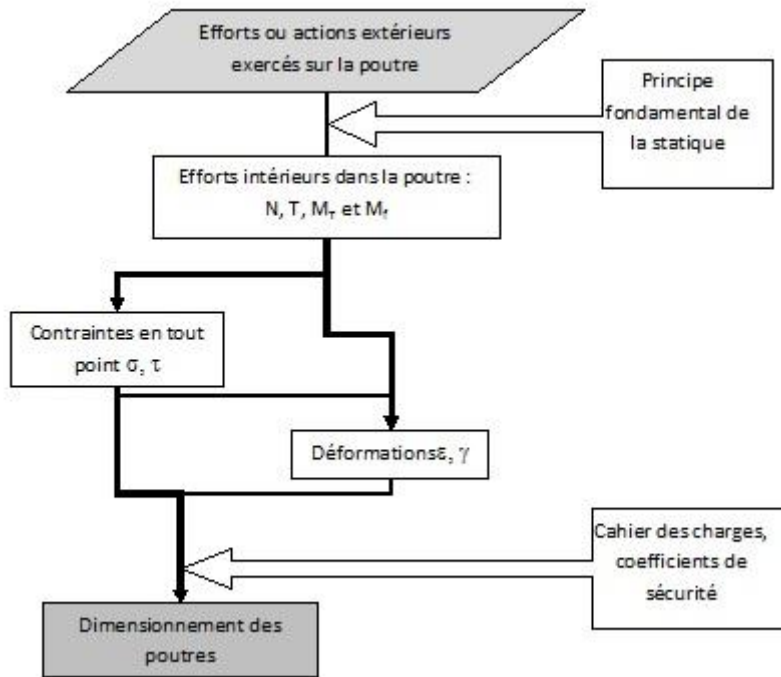


Figure 2 : principe de détermination des contraintes et déformations en RDM.

### 3.2.1.2 Outils au calcul

#### Notion de poutre

De manière générale, une poutre est un solide en trois dimensions dont une longueur est grande devant les deux autres. Cette structure est dite élancée.

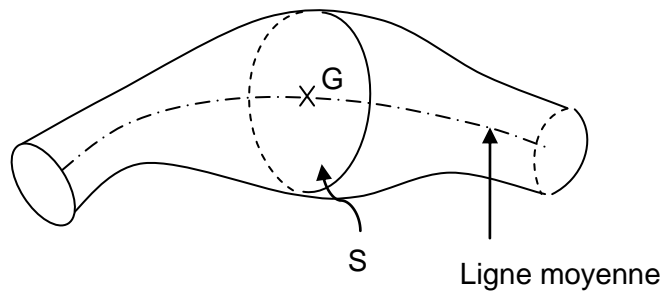


Figure 3 : schéma d'une poutre.

Soit S une section droite de cette poutre. Soit G le centre de gravité de cette section.

L'ensemble des centres de gravité forme la ligne moyenne de la poutre.

La poutre doit vérifier différentes propriétés :

- la ligne moyenne doit être droite ou à fort rayon de courbure.
- les sections S sont constantes ou varient de manière progressive.

#### Torseur de cohésion

Les efforts intérieurs (ou de cohésion) sont les efforts qui agissent à l'intérieur des poutres et qui assurent l'équilibre ou la cohésion de la structure sous l'action des charges extérieures exercées.

Les efforts intérieurs sont calculés à l'aide du principe fondamental de la statique, à partir des actions extérieures agissant sur la poutre.



Pour ce faire, on utilise un plan de coupe imaginaire (une section S de centre de gravité G) qui divise la poutre en deux tronçons fictifs E<sub>1</sub> et E<sub>2</sub>. Chacun de ces domaines est en équilibre et l'application du principe fondamental de la statique à l'un ou à l'autre, permet de faire apparaître et de calculer les efforts intérieurs qui s'exercent au niveau de la coupure.

Le torseur de cohésion est le torseur associé aux actions mécaniques (forces et moments) qui s'exercent sur la section S du tronçon E<sub>1</sub>. Il s'exprime en G, centre de gravité de S et est fonction de s, son abscisse curviligne.

$$\{\mathcal{T}_{coh}\} = \{\mathcal{T}_{E_2/E_1}\}$$

La notation est la suivante :

$$\{\mathcal{T}_{coh}\} = \begin{Bmatrix} \vec{R}_G \\ \vec{M}_G \end{Bmatrix}_G = \begin{Bmatrix} N & M_t \\ T_y & M_{fy} \\ T_z & M_{fz} \end{Bmatrix}$$

avec comme fonctions de s :

$$\begin{aligned} \vec{N} &= N\vec{x} \text{ effort normal,} \\ \vec{T} &= T_y\vec{y} + T_z\vec{z} \text{ effort tranchant,} \\ \vec{M}_t &= M_t\vec{x} \text{ moment de torsion,} \\ \vec{M}_f &= M_{fy}\vec{y} + M_{fz}\vec{z} \text{ moment de flexion.} \end{aligned}$$

Notion de contrainte

Lorsqu'une pièce est sollicitée, chaque élément de la section résiste à un certain effort. Le contrainte est la valeur de cet effort, rapporté à l'unité d'aire de la section. En simplifiant, on peut dire que la contrainte est la force intérieure appliquée à l'unité de surface au point donné de la section donnée. Elle s'exprime en N/mm<sup>2</sup> dans le système international.

On distingue deux types de contrainte :

- La contrainte normale σ qui est perpendiculaire à la section.
- La contrainte tangentielle (ou de glissement) τ qui est dans la direction de la section.

Hypothèses fondamentales

Afin d'être valides, les formules et propriétés établies dans la suite supposent un certain nombre d'hypothèses.

- Les matériaux étudiés sont homogènes et isotropes. Un corps est homogène lorsque tous les cristaux ou tous les grains de matières sont identiques (ils ont la même constitution et la même structure). Un solide est isotrope lorsque tous les points de sa structure ont les mêmes caractéristiques mécaniques dans toutes les directions.

- Principe de Saint Venant : les résultats de la RDM sont valables loin des conditions aux limites imposées sur la poutre.

- Hypothèse de Navier Bernoulli : les sections droites, planes et perpendiculaires à la ligne moyenne, restent planes et perpendiculaires à la ligne moyenne après déformation. Il n'y a pas de gauchissement des sections droites.

**3.2.1.3 Différentes sollicitations**

Si une seule composante du torseur existe alors que toutes les autres sont nulles on dit que l'on a une sollicitation simple.

Si deux composantes au moins sont non nulles, on obtient une sollicitation composée.

Cas	Composantes			
	N	T	M <sub>t</sub>	M <sub>f</sub>
<b>Traction</b>	X	0	0	0
<b>Cisaillement</b>	0	X	0	0
<b>Torsion</b>	0	0	X	0



Flexion pure	0	0	0	X
--------------	---	---	---	---

### 3.2.2 Traction simple

#### 3.2.2.1 Définition

Une poutre est sollicitée en traction simple lorsqu'elle est soumise à deux forces directement opposées qui tendent à l'allonger.

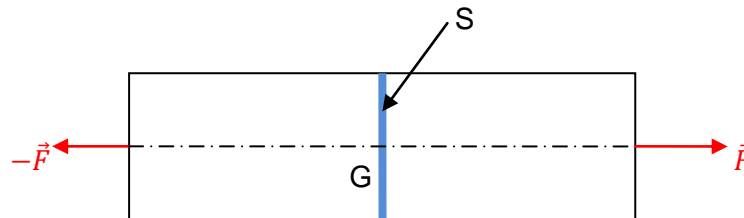


Figure 4 : principe de la traction.

Le tenseur de cohésion s'écrit alors sous la forme :

$$\{T_{coh}\} = \begin{cases} F\vec{x} \\ \vec{0} \end{cases} \text{ avec } F > 0$$

#### 3.2.2.2 Courbe et caractéristiques

On mesure les qualités d'un matériau en termes d'élasticité, de résistance et de plasticité grâce à un essai de traction. Une éprouvette, aux dimensions normalisées est saisie entre les mâchoires d'une machine qui lui applique des forces comme décrit précédemment.

On obtient alors la courbe suivante qui représente l'allongement de l'éprouvette en fonction de la force qui lui est appliquée :

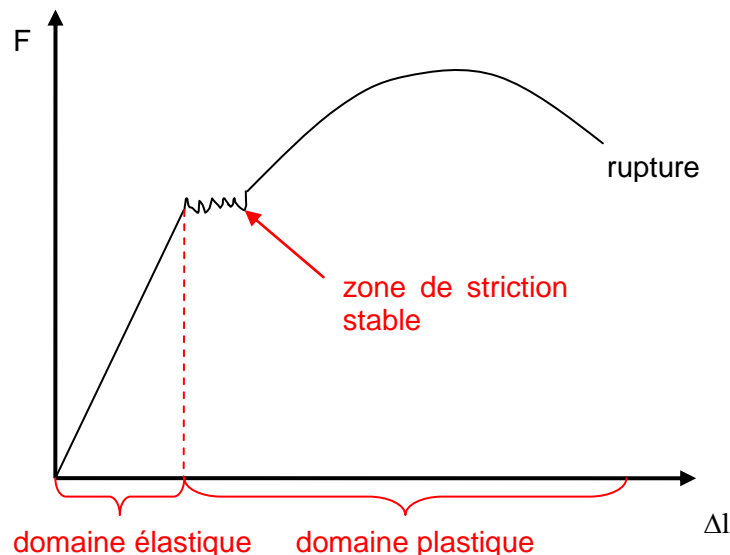


Figure 5 : courbe de traction.

Dans la zone élastique, on remarque qu'il existe une relation de linéarité entre ces deux grandeurs. Dans cette zone, les déformations engendrées par les actions mécaniques s'annulent lorsque l'on supprime ces charges.

La zone plastique correspond au domaine dans lequel il reste des déformations permanentes



même si l'on supprime les actions mécaniques.

Grâce à un autre type de courbe, on peut obtenir certaines des constantes caractéristiques du matériau. Celle-ci représente la contrainte (force par unité de surface) en fonction de la déformation (allongement rapporté à la longueur initiale de l'échantillon).

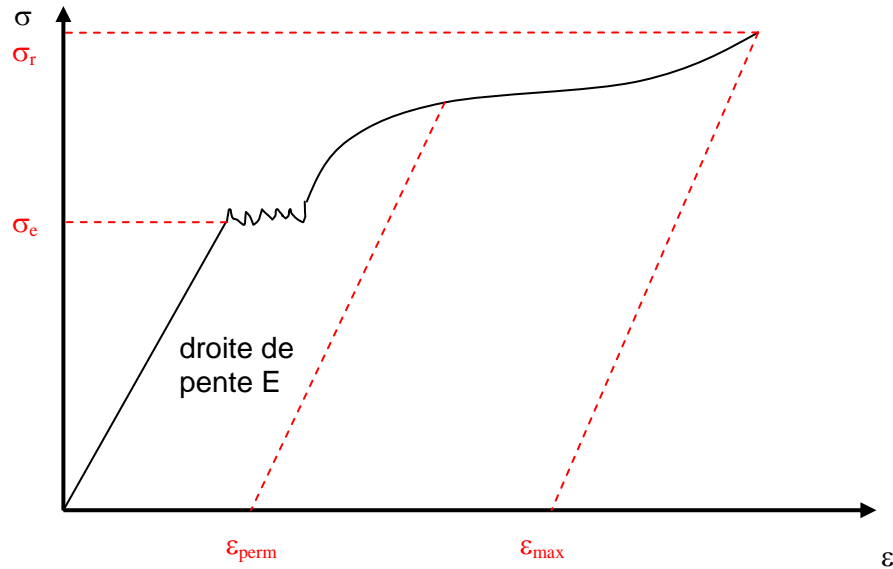


Figure 6 : courbe contrainte-déformation.

Caractéristiques du matériau :

E : module de Young (ou module d'élasticité longitudinal) [MPa]

$\sigma_e$  : contrainte limite élastique [MPa]. C'est la valeur maximale de la contrainte pour rester dans le domaine élastique.

$\sigma_r$  : contrainte limite de rupture [MPa]. Au-delà, l'éprouvette se rompt.

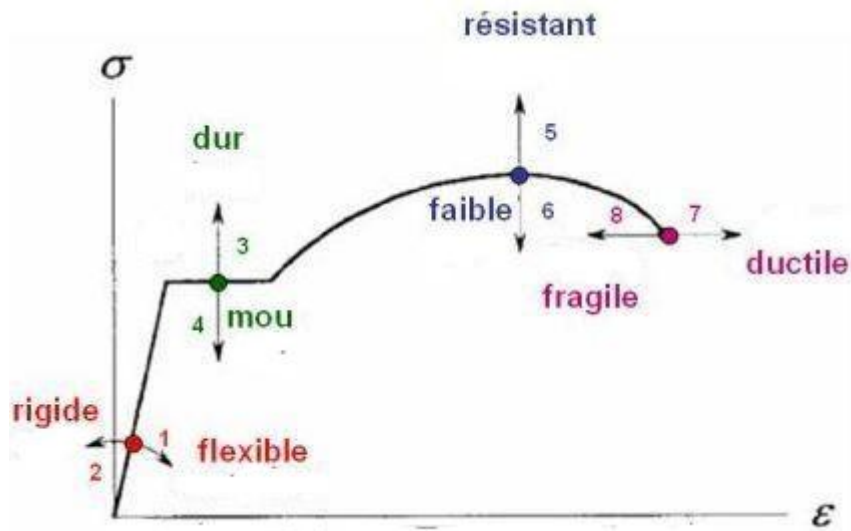


Figure 7 : caractéristiques physiques du matériau.

### 3.2.2.3 Relations

En élasticité, on montre qu'il existe un rapport constant entre la contraction relative transversale et l'allongement relatif longitudinal.



$$\frac{\Delta d}{d} = -\nu \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

$\nu$  : coefficient de Poisson (caractéristique du matériau) [sans unité]

On peut aussi noter

$$\frac{\Delta l}{l} = \varepsilon_x \text{ et } \frac{\Delta d}{d} = \varepsilon_y$$

d'où

$$\varepsilon_y = -\nu \cdot \varepsilon_x$$

En ce qui concerne les contraintes, on définit la contrainte normale :

$$\sigma_x = \frac{F}{S}$$

La loi de Hooke donne :

$$\sigma_x = E \cdot \varepsilon_x$$

c'est à dire

$$\varepsilon_x = \frac{F}{ES}$$

Il y a proportionnalité entre l'effort F et l'allongement  $\Delta l$  dans le domaine élastique.

$$\frac{F}{S} = E \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

avec S section de l'éprouvette [mm<sup>2</sup>] et l sa longueur initiale [mm].

Cette relation n'est valable que pour une poutre de section constante.

### 3.3 Emission acoustique

#### 3.3.1 Le principe physique du contrôle non destructif par émission acoustique

##### 3.3.1.1 Définition générale de l'EA

Le contrôle permanent des équipements industriels permet de garantir leur fonctionnalité, afin d'éviter leur rupture catastrophique et permettre ainsi d'assurer la sécurité du personnel. Pour pouvoir garantir cette sûreté, des moyens sont mis en œuvre, afin de réduire au maximum le risque accidentel dû à une défaillance du matériau.

L'émission acoustique est un contrôle non destructif, avec une analyse en temps réel.

Elle consiste en la détection des ondes ultrasonores émises par le bruit généré par la pièce qui se dégrade, celle-ci subissant une contrainte matérielle. Elle permet de fournir des informations sur les défauts en cours de formation dans un matériau, en temps réel.

Les ondes permettent aussi de caractériser des matériaux, surveiller des fabrications et suivre le fonctionnement des structures.

Le contrôle non destructif qui permet moins de pertes matérielles, peut être effectué sans besoin d'arrêt des équipements industriels et dans des conditions de fonctionnement normales.

*« Prenons l'exemple d'une fissure qui se propage. A l'échelle microscopique, sa progression se fait généralement de manière discontinue par une succession de micro déplacements. Chacun d'entre eux génère une "onde élastique transitoire" : une sorte de bruit très bref, dans le domaine ultrasonore. Des bruits qui trahissent la fissure, pour peu que l'on sache les capter et les analyser. Un peu comme les craquements accompagnent la rupture de la branche sur laquelle est assis le bûcheron... »*

*L'usine Nouvelle.*





D'un point de vue physique, l'émission acoustique résulte d'une libération d'énergie sous forme d'ondes élastiques transitoires au sein d'un matériau sous contrainte de tension. Les signaux sont recueillis par des capteurs placés sur le matériau et peuvent être alors étudiés.

Le signal acoustique possède diverses propriétés : sa fréquence est comprise dans le domaine ultrasonore entre 20 kilohertz et 2 mégahertz. De plus, son amplitude s'étend de quelques microvolts à quelques centaines de millivolts à la sortie du capteur.

Plusieurs phénomènes peuvent être sources d'émission acoustique :

- La propagation d'une fissure le long d'un matériau et amorçage des fissures
- Un délaminage ou une rupture de fibre dans les structures composites
- Une déformation plastique : mouvement de dislocation
- La corrosion
- Les frottements
- Des fuites de liquide ou de gaz

### 3.3.1.2 *Historique de l'émission acoustique*

Cette technique possède une maturité industrielle reconnue. Elle n'a fait l'objet d'une étude sérieuse qu'à partir des travaux de Kaiser, en 1950. Depuis, son évolution a été très rapide. Après être apparue aux Etats-Unis, elle a fait son arrivée en Europe en 1987.

**1900:** Connaissance, par les forgerons du "cri de l'étain".

**1950 :** Un Américain, Kaiser, pose les fondements de l'émission acoustique dans le domaine ultrasonore. Ce qui a porté au démarrage de la technique.

**1964 :** Le contrôle des réservoirs de la fusée Polaris ouvre le bal des applications industrielles.

**1975 :** En France, premières applications aux contrôles de capacités de pression à la Marine Nationale.

**1975 :** La technique est homologuée par les autorités de sûreté de Centrales Nucléaires françaises, sur les circuits primaires.

**1980 :** Développement dans des directions variées : inspection et qualification des matériaux composites, investigation physique des matériaux, surveillance de fabrication...

## 3.3.2 *Le signal et les systèmes de traitement actuels*

### 3.3.2.1 *La mise en œuvre des expérimentations*

Les expériences effectuées sur les matériaux adoptent le même schéma :

- Mesure d'atténuation des ondes ultrasonores
- Mise en place des capteurs
- Mise sous contrainte de l'équipement suivant un cycle prédéfini
- Enregistrement des signaux pendant le cycle avec l'aide d'un logiciel
- Analyse des résultats et classification de l'activité détectée

L'élément intermédiaire est un détecteur ou capteur piézo-électrique de fréquence propre élevée qui transforme les sollicitations mécaniques reçues en signaux électriques directement envoyés à un système d'exploitation des données.

L'onde ultrasonore se propage depuis la source jusqu'au capteur en subissant un certain nombre de perturbations :

- Atténuation : en fonction de la distance, de la fréquence, de la température.
- Dispersion : avec les anomalies de surface et la forme géométrique.
- Division : suivant plusieurs trajets.
- Concentration : éventuellement si la forme géométrique de la surface le permet.





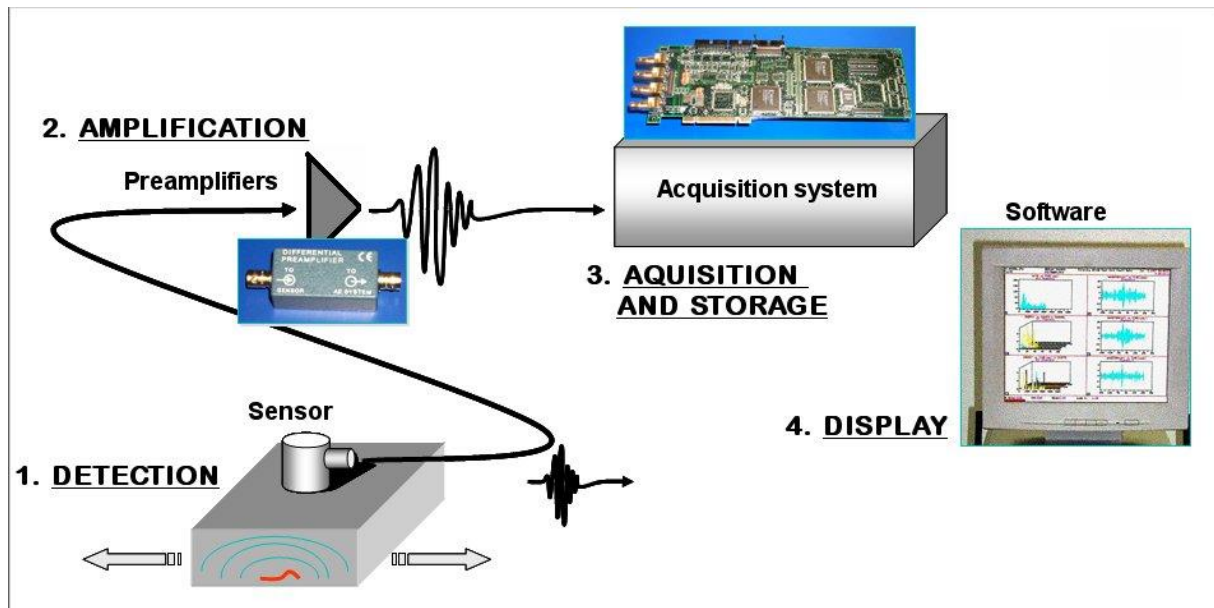


Figure 8 : montage général d'EA sur un matériau quelconque.

### 3.3.2.2 La nature du signal

L'émission acoustique est la propagation d'un ébranlement au sein d'un matériau. L'événement dit "source" peut créer des ondes, soit longitudinales soit transversales. Ces ondes se propagent jusqu'à la surface du matériau, où une partie se réfléchit et une autre se convertit en d'autres types d'ondes.

On a les ondes de surface, ou ondes de Rayleigh pour une épaisseur supérieure à 30mm ; et les ondes de Lamb pour celles inférieures à 30mm.

Ces ondes se propagent avec une atténuation plus faible que les ondes de volume ; ainsi, on peut les détecter à des distances importantes de la source.

Les capteurs et les instruments de mesure permettent de détecter et analyser les ondes afin d'extraire des informations concernant la source.

### 3.3.2.3 Les capteurs

Par définition, le capteur est le dispositif convertissant une grandeur vibratoire caractéristique de l'onde d'émission acoustique en signal électrique.

Dans l'idéal, un bon capteur permet de mesurer une grandeur physique avec une grande sensibilité. De plus, il doit être petit afin de pouvoir s'adapter au matériau expérimenté et peu coûteux car pour les essais industriels, de nombreux capteurs sont nécessaires. Enfin, il doit pouvoir s'adapter aux différents angles et directions que prend l'onde.

Afin de pouvoir exploiter au mieux les données, un capteur doit répondre aux exigences suivantes : sensibilité (notamment au type d'onde attendu), directivité et enfin réponse en fréquence.

L'élément sensible du capteur piézo-électrique est constitué d'une céramique généralement en titane zirconate de plomb, fixée dans un boîtier.

Les capteurs piézo-électriques utilisés sont sensibles à des déplacements inférieurs à  $10^{-10}$  mètres, ils sont fiables tout en étant disponibles à un coût abordable. Ils restent les plus utilisés malgré une fonction de transfert mal connue qui dépend de l'incidence de l'onde et du préamplificateur.

Afin que le capteur puisse remplir ces fonctions, il doit être situé près d'un préamplificateur qui adapte le signal et applique une première amplification d'environ 40 dB. De plus, il peut comporter un système de filtrage afin d'éviter la saturation et l'amplification de bruits parasites. Enfin, un second amplificateur amène le signal émis par la source au niveau désiré afin de pouvoir traiter et analyser les données. Ces amplificateurs peuvent amplifier le signal de 20 à 60 dB.



Pour améliorer encore la qualité des signaux transmis, des filtres passe-haut et passe-bande peuvent être incorporés.



Figure 9 : capteurs piézo-électriques.

Afin de pouvoir choisir au mieux le capteur à utiliser, il faut prendre en compte l'environnement de travail: température, espace disponible, bruit de fond de la structure, perturbations diverses, etc.

### 3.3.3 Traitement du signal : les techniques les plus utilisées

Différentes techniques sont utilisées afin de traiter le signal transcrit. Sur ce sujet, les évolutions sont permanentes, grâce aux nombreux progrès liés à l'informatique.

L'émission acoustique se présente en sortie de capteur soit :

- comme un bruit de fond large-bande : c'est l'émission continue.
- comme un signal constitué d'événements séparés, de durée limitée, apparaissant de manière aléatoire : c'est l'émission discrète.

Les objectifs du traitement du signal sont de mesurer les différents paramètres du signal, les analyser et les interpréter. La détermination de l'intensité de l'émission observée ainsi que du contenu de signaux permet alors de caractériser les mécanismes sources.

#### 3.3.3.1 Comptage d'événements

Cette technique consiste à comparer le signal d'émission acoustique avec une tension de référence (ou seuil). Cette dernière peut être constante ou asservie à l'enveloppe du signal. On compte alors les franchissements de ce seuil, en termes d'alternances, qui représentent l'énergie acoustique émise ou encore de nombre de salves (ou événements), qui correspondent aux nombre de signaux discrets émis.

Ces méthodes ont été très utilisées auparavant. Mais leur usage tend à diminuer en raison de la difficulté d'interprétation physique, de l'aspect qualitatif des résultats et de l'influence des multiples paramètres tels que le seuil ou encore la réponse du capteur.

#### 3.3.3.2 Mesures globales d'activité

Il s'agit d'effectuer un certain nombre de mesures caractéristiques du signal, pendant chaque période de temps élémentaire, préfixée par l'opérateur : valeur moyenne et valeur efficace du signal, énergie ou encore amplitude de crête.

Ce type de mesures est très courant car simple de mise en œuvre et facile à interpréter. Il permet de mettre en lumière des modifications globales de comportement sans toutefois distinguer précisément leur origine.



### 3.3.3.3 Caractérisation individuelle des salves

Chaque salve d'émission acoustique est caractérisée par un certain nombre de paramètres. Leur mesure et acquisition sous forme numérique par un ordinateur permet d'effectuer de nombreuses analyses temporelles et statistiques.

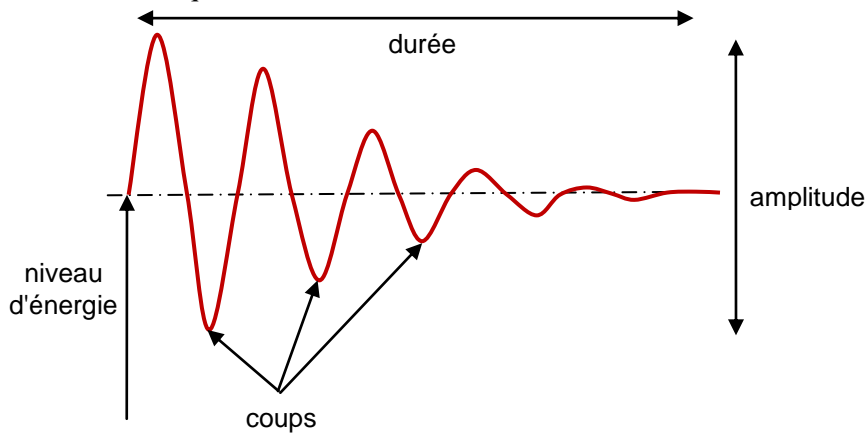


Figure 10 : schéma d'une salve (ou wave).

### 3.3.3.4 Localisation des sources

Il s'agit de déterminer les coordonnées du point ou de la zone où s'est produit l'événement. La méthode la plus utilisée consiste à mesurer les différences de temps d'arrivée jusqu'aux capteurs. On a alors pour chacun des capteurs l'équation  $V \cdot \Delta t = cst$  (avec  $V$  la vitesse de l'onde). Il s'agit de branches d'hyperboles. Cela revient donc à calculer les coordonnées de l'intersection de ces différentes hyperboles.

### 3.3.4 Les principales applications liées à l'EA



### 3.3.5 Les avantages et les limites de cette technique

Avantages	Limites
<i>Grande sensibilité aux évènements pendant la fissuration, donc sensible à la croissance d'un défaut</i>	La pièce doit être mise sous contrainte et déjà fissurée
<i>Méthode globale, couvre une structure complète en un seul examen</i>	Interprétation délicate des signaux : Caractérisation difficile des défauts (position, type, dimension)
Appareillage assez simple, peu de contraintes d'accès	Incertitudes importantes, ce qui rend la méthode difficilement quantitative aujourd'hui
Adapté au suivi en fonctionnement (le dispositif peut rester monté sur la pièce)	Le placement des capteurs se fait aujourd'hui de manière assez empirique lors de l'étalonnage
Peut remplacer l'épreuve hydraulique lorsque celle-ci est nocive à un coût inférieur	Etalonnage délicat (notamment pour mesurer les vitesses de propagation)

Cette technique présente un coût élevé pour certaines entreprises. De plus, sa mise en œuvre peut être délicate sur quelques structures. Enfin, afin de pouvoir bien interpréter les résultats, un professionnel est nécessaire.

### 3.4 Expériences

La machine que nous avons utilisée pour réaliser nos essais est une machine de traction, c'est-à-dire un appareil qui exerce deux forces opposées de chaque côté du matériau pour essayer de l'étirer.

On place d'abord notre éprouvette entre les deux mors de l'appareil, on sert de façon à ce que le matériau ne puisse pas glisser des mors, en faisant attention à ne pas écraser ou endommager le matériau. On place ensuite des capteurs sonores dans les moitiés supérieures et inférieures de l'éprouvette, que l'on vient fixer avec des pinces. On ajoute du silicone entre le capteur et le matériau afin que les ondes sonores atteignent plus facilement le capteur. On ajoute enfin à cet assemblage un instrument permettant de mesurer précisément l'allongement de l'éprouvette : l'extensomètre.

Après avoir mis en place le montage, il faut rentrer des coefficients dans l'ordinateur. On règle alors le seuil de détection des ondes sonores pour ne pas prendre en compte les bruits parasites tels que des claquements de main ou le bruit de la machine. On rentre également la charge que l'on veut que la machine exerce sur l'éprouvette, et la durée pour atteindre cette charge. Puis on fait le test du cassé de mines : on casse quelques mines de crayon de 0,5mm sur le matériau pour s'assurer de la qualité des ondes obtenues, afin que les résultats puissent être analysés.



Figure 11 : montage.



Finalement, on gardera les courbes de l'activité générale, la courbe de Pollock ainsi que les tableaux de données (valeur de la force appliquée et de l'extensomètre) de chaque essai pour pouvoir les analyser et essayer de déterminer quelle onde sonore correspond à quel type d'endommagement.

La courbe de Pollock nous donne des informations sur l'amplitude des événements (dB) ainsi que sur leur durée. Les différentes couleurs définissent la densité des événements : par exemple, un point rouge symbolise un très grand nombre d'événements alors qu'un point kaki n'en représente que peu.

Pour plus de commodité, l'ensemble des courbes obtenues à l'ordinateur lors de chacun des essais sont consignées en annexe.

### 3.4.1 Carbone époxy

#### 3.4.1.1 Charge à la rupture (QI)

Activité générale (cf. annexe 1) :

On remarque qu'au bout de 80 secondes environ, il y a déjà une forte concentration de coups d'une amplitude de 40db (points rouges). Le graphique n°4 nous montre que ce phénomène arrive au moment où la charge devient constante. Juste avant, on retrouve une concentration de coups un peu moins dense (points verts foncés), mais autour de la même amplitude, qui se poursuit après cette forte intervention. Sur le graphique n°1, on retrouve ce même phénomène à partir de 280 secondes, mais qui se poursuit cette fois plus longtemps, tandis que le graphique n°4 nous révèle une concentration de coups moins dense (points bleus foncés).

On peut donc penser que lors de la charge il y a une première rupture de quelques fibres, puis il y a eu une rupture plus importante au bout de 10kN. La rupture de fibres s'est alors poursuivie pendant que la charge restait constante. Il y a donc un endommagement du matériau en fonction du temps auquel il est soumis à la charge.

Les graphiques 5 et 6 nous révèlent un décrochement net au bout de 275 secondes. Ce phénomène correspond à la rupture du matériau.

Quant aux graphiques 3, 4 et 5, ils nous renseignent sur l'endroit de l'endommagement. Ici, le micro 1 a entendu plus d'événements que le micro 2, il y a donc eu plus d'endommagement du côté du micro 1.

Pollock (cf. annexe 2) :

On voit une concentration importante d'événements de courte durée entre 40 et 45db (points rouges). Ces événements correspondent à une rupture nette et importante de la fibre. Autour de ces événements, on retrouve deux autres familles de points, de densité de coups moins importants, mais également concentrés au même endroit. Les points verts foncés sont très proches des points rouges, ils peuvent donc correspondre à la rupture de paquets de fibres, tandis que les points bleus foncés sont un peu plus étendus (de 40 à 60db), et correspondent à des événements plus longs, soit la rupture de quelques fibres.

Sur ce graphique, on retrouve et également d'autres points, beaucoup plus étendus et de longueur variable (points turquoise, violets et verts clairs). Ces événements n'ont pas de signature particulière. On ne peut donc pas déterminer leur nature en utilisant uniquement l'émission acoustique.

#### 3.4.1.2 Load-unload AP

Activité générale (cf. annexe 3) :

Lors de la charge, on remarque, sur la graphique n°4, une augmentation du nombre d'événements (points verts clairs à verts foncés), pour arriver à une densité de coups maximale en fin de charge (points verts foncés à rouges). Grâce au graphique n°1, on peut voir que les événements les plus concentrés, ceux repérés par un point rouge, ont une amplitude bien définie, soit 40db. Il s'agit alors d'une rupture consécutive de fibres. Quant aux événements repérés par des points verts et bleus, c'est-à-dire ceux qui ont une densité de coups un peu moins importante, ils ont une amplitude allant jusqu'à 60db, ce qui est un faible écart d'amplitude. En comparant avec le graphique n°4, on en déduit





que ces événements correspondent eux aussi à une rupture de fibre, mais en moins grosse quantité. Les autres points correspondent à des événements ponctuels, on ne peut donc rien en déduire avec cette méthode uniquement.

On peut voir sur le graphique n°4 que le matériau n'est pas endommagé seulement pendant la charge, mais également lors de la décharge. On remarquera que plus la charge appliquée sera grande, plus il y aura d'événements à la décharge.

La courbe du graphique n°5 nous permet de repérer l'intensité d'énergie des événements. On remarque alors que pendant les 4100 premières secondes l'énergie totale de l'endommagement augmente peu et progressivement. Mais au cours des deux dernières charges, on peut voir un des sauts d'énergie, qui correspondent à la rupture du tissu.

Les graphiques n°2, 3 et 4 nous renseignent sur la position des événements. Encore une fois, on remarque que le micro 1 entend plus d'événements que le micro 2. On peut donc conclure que l'origine de l'endommagement est proche du micro 1, ou que nous avons mal positionné le deuxième micro.

Pollock (cf. annexe 4) :

Dans ce cas, les événements sont moins dispersés que pour le cas de la charge à la rupture du QI. Les événements dont la densité de coups est la plus importante sont très courts et ont une amplitude de 45dB (points rouges et bleus). Ils correspondent alors à la rupture de fibre. Les événements repérés par les points violets et verts n'ont aucune signature particulière, on ne peut donc tirer aucune conclusion pour le moment.

Détermination de l'endommagement :

Une méthode permet de déterminer l'endommagement  $d$  du matériau au cours du cycle :

$$d_i = 1 - \frac{E_i}{E_1}$$

avec  $E_i$  le module de Young de chaque cycle.

Nous avons essayé de déterminer  $E$  grâce à deux méthodes. La première (en bleu) en utilisant la pente entre 0% et 0.05% de la déformation. La deuxième (en rouge) en appliquant une régression linéaire au début de chaque cycle. On remarque que la deuxième méthode est davantage conforme puisque l'endommagement est croissant et positif.

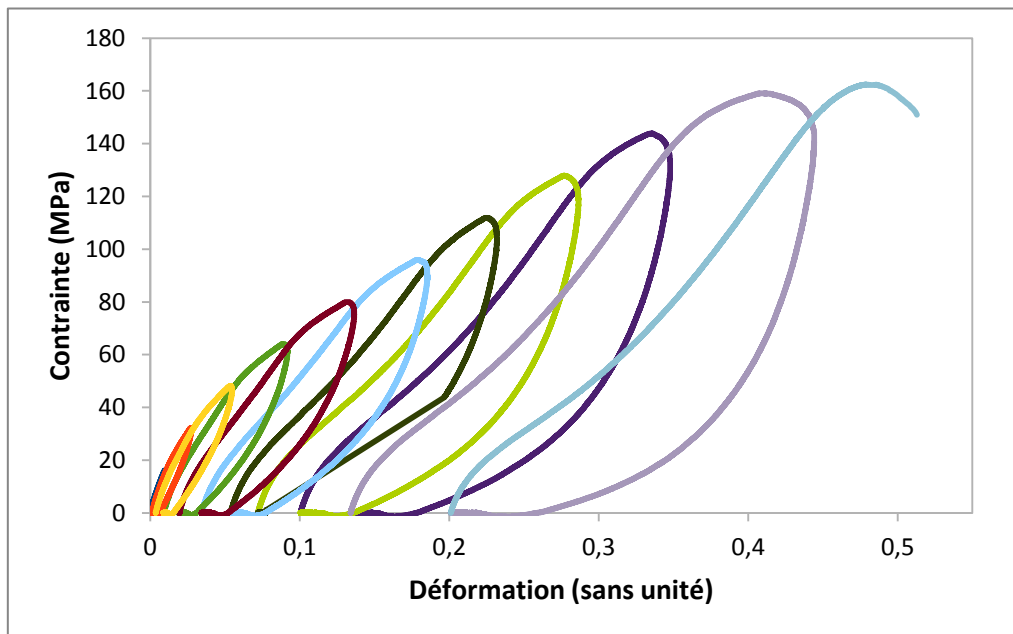


Figure 12 : courbe de traction de l'AP en load-unload (les couleurs représentent les différents cycles).



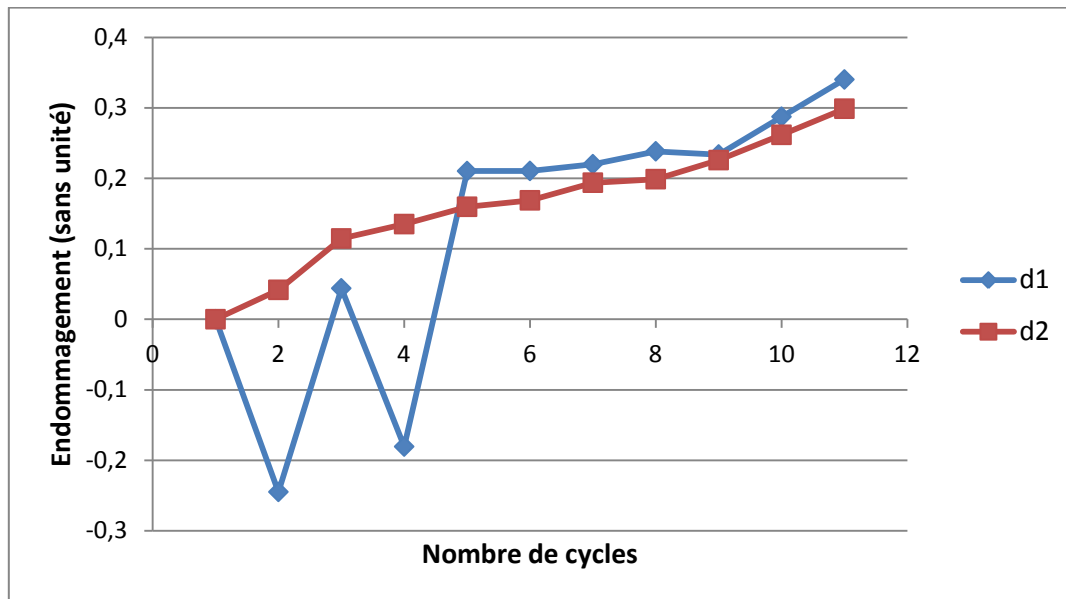


Figure 13 : Endommagement de l'AP en fonction du nombre de cycles.

### 3.4.1.3 Load-unload QI

Activité générale (cf. annexe 5) :

Malheureusement, nous avons eu quelques problèmes de saturation lors de cette expérience. Néanmoins, nous pouvons remarquer qu'au moment où nous devrions atteindre la fin de la charge, il y a une forte concentration d'événements (points rouges), et qu'il y a de l'endommagement lors de la décharge. Ce qui confirme ce qui a été dit sur la charge/décharge de l'essai précédent. Nous pouvons également distinguer qu'il y a moins d'événements à forte densité de coups que dans l'expérience précédente. Ceci est dû à l'orientation des plis dans les matériaux. En effet, dans le matériau précédent, une majorité des plis étaient orientés à 0°, alors qu'ici, trois plis sur sept sont orientés à 45°. Comme nous l'avons dit à plusieurs reprises, ces événements correspondent à la rupture de fibre.

Contrairement à l'essai sur le carbone époxy AP, ici, les sauts d'énergie commencent au bout de 1250 secondes, soit dès la quatrième charge/décharge. On peut penser que cette différence correspond à la différence de répartition de charges sur les plis orientés à 0 ou 45 degrés.

Le graphique n°5 nous informe que cette fois, c'est le micro 2 qui entend le plus d'événements. L'endommagement est donc plus fort dans la partie de l'éprouvette occupée par ce micro.

Pollock (cf. annexe 6) :

Comme pour l'expérience précédente, il y a une grande concentration d'événements de très courte durée et d'une amplitude de 35dB, ce qui représente un écart de 10dB par rapport au AP. Cet écart d'amplitude peut être dû aux différentes orientations des plis dans chaque matériau.



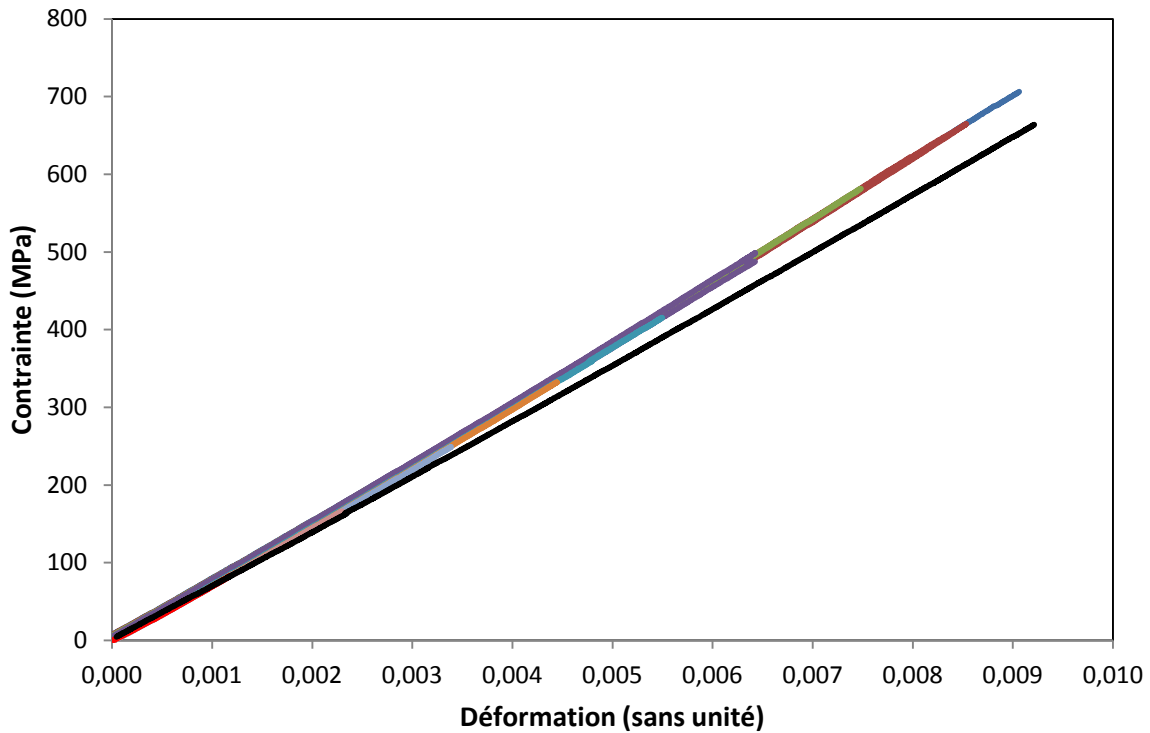


Figure 14 : courbe de traction du QI en charge à la rupture et load-unload.

La courbe en noir est la courbe de traction en charge jusqu'à la rupture et les couleurs correspondent aux différents cycles de l'essai en load-unload.

On remarque qu'à l'origine, les deux courbes sont tangentes, ce qui confirme que le matériau présente le même comportement. Après plusieurs cycles, la pente de la droite semble se redresser ce qui signifie que la rigidité du matériau augmente. Ce résultat est étonnant et donc intéressant. Par ailleurs, la méthode de détermination de l'endommagement utilisée précédemment n'est plus convenable puisque l'endommagement est ici négatif et décroissant.

### 3.4.1.4 Charge à la rupture fibre seule

#### Activité générale (cf. annexe 7) :

Pour cette expérience, nous avons utilisé un seul micro que nous avons placé au centre de l'éprouvette afin d'obtenir des résultats plus nets. Ce qui explique que nous ayons les courbes d'un seul channel dans les graphiques correspondants.

La première courbe nous montre une augmentation régulière de la charge, pendant laquelle le nombre d'évènements devient de plus en plus grand, jusqu'à la rupture du tissu, que l'on remarque par une chute brutale de la charge appliquée, et une densité de coups de plus en plus grande (points rouges et verts). On voit également un léger décrochement à environ 125 secondes, accompagné d'un nombre d'évènements très grand, puis un peu moins important (points verts puis points bleus foncés). Ce phénomène pourrait correspondre à la rupture de quelques fibres de carbone.

#### Pollock (cf. annexe 8) :

Pour le tissu seul, comme pour le composite, les évènements les plus nombreux se situent autour de 40db. Néanmoins, on remarque que ces évènements dans le tissu seul sont légèrement plus longs que dans le composite. Ceci est dû à la présence de la résine époxy dans les composites, qui a tendance à amortir les oscillations.





### 3.4.2 Autres matériaux

#### 3.4.2.1 Plastique : polypropylène

Dimensions de l'éprouvette: 141\*9\*4 mm

Avec l'éprouvette plastique, on a fait deux essais :

- 1er essai. Au sein du matériau, les molécules s'allongent, on constate qu'il n'y a pas de bruit. La phase centrale de l'éprouvette blanchit. Toutefois, l'essai n'est pas concluant. Il est arrêté. En effet, les niveaux d'énergie des ondes émises sont assez faibles et sont dans la même gamme que la machine. Ce qui rend difficile la prise de mesures.

- 2ème essai. Le second essai est effectué sur le même type d'éprouvette, mais on diminue le seuil de détection. La charge est diminuée. La contrainte augmente car la section de l'éprouvette diminue, cela est dû à l'allongement du plastique. L'essai est effectué jusqu'à rupture du plastique.

Les analyses sont obtenues à partir, notamment, de la courbe de Pollock. On distingue des populations d'endommagement différentes, en fonction de l'amplitude.

Evénements:

- rouge : de 23 à 27 dB
- bleu foncé : de 22 à 28 dB
- turquoise : de 25 à 34 dB
- violet : de 25 à 43 dB
- vert : 23 à 80 dB

Le plastique ne s'endommage pas au début de l'expérience, de 0 à 200 secondes. Cela s'explique par l'allongement des molécules à l'intérieur du matériau (élasticité du matériau). Toutefois, on constate une rupture nette vers 230 Secondes. Ce qui correspond à la rupture totale de la partie plastique. De 230 à 330 secondes, ce n'est plus la partie plastique qui est endommagée, vu qu'elle a rompu nettement. En effet, ce matériau dispose d'une enveloppe, qui n'est pas rompue mais se déforme lorsque le plastique a rompu.

Les événements majeurs se concentrent autour de 23 à 65 dB.

#### 3.4.2.2 Métal : aluminium

Dimensions de l'éprouvette : 304\*10\*2 mm.

L'aluminium n'adopte pas un comportement élastique. La déformation de ce matériau est pilotée par un mouvement de dislocation dû à un défaut du réseau cristallin. La dislocation est une modification du schéma cristallin, il y a rupture au seuil des réseaux, ce qui provoque une concentration de molécule dans un endroit donné.

Il y a une augmentation de la ductilité: capacité à la déformation sans se rompre.

La courbe de Pollock nous donne les résultats suivants:

Evénements:

- rouge : 37 dB
- turquoise : 37 à 43 dB
- violet : 41 à 46 dB
- vert : 38 à 100 dB

De 0 à 50 secondes, le métal se déforme et s'endommage, sans se rompre. De 50 à 550 secondes, l'aluminium se détériore toujours, mais moins rapidement. Très peu d'événements interviennent sur un temps assez long. Toutefois, on constate une rupture du matériau vers 550 secondes. L'amplitude des événements atteint 100 dB. Grâce à la courbe de l'énergie en fonction du temps, on constate qu'il y a deux paliers d'énergie: à 70 et à 580 secondes.

#### 3.4.2.3 Bois : chêne

Dimensions de l'éprouvette : 250\*24\*4 mm.



On relève les informations suivantes grâce à la courbe de Pollock :

Evénements:

rouge: 44 dB

turquoise : 46 dB

violet : 43 à 48 dB

vert: 44 à 105 dB

On constate qu'il y a très peu d'événements entre 60 et 105 dB.

Les premiers événements s'effectuent sur un temps très court, la rupture se fait de manière brutale et apparaît vers 38 secondes.

Les événements interviennent entre 0 et 36 secondes, donc sur une durée très courte. La déformation est progressive et de manière linéaire jusqu'à rupture. Il n'y a qu'un seul niveau d'énergie. On peut donc émettre l'hypothèse que le bois n'est pas un élément ductile, en comparaison avec l'aluminium ou le plastique. En effet, le bois se rompt 4 fois plus rapidement que le plastique.

### 3.4.3 Comparaison

En ce qui concerne le carbone époxy, on a d'abord pu remarquer que le composite travaillait non seulement pendant la charge, mais également pendant la décharge. De plus, le matériau résiste plus longtemps lorsqu'il est soumis à une charge/décharge, plutôt qu'à une charge à la rupture.

On a également pu constater que l'orientation des plis au sein du matériau modifiait l'amplitude de l'onde sonore émise lors de la rupture. On peut donc penser que plus il y a de fibres à 45°, moins l'amplitude du son est grande. Ceci est sûrement dû à la résine qui a tendance à atténuer la rupture. En effet, lorsque les fibres sont orientées à 45°, la résine époxy a tendance à subir plus la charge que quand les fibres sont à 0°.

De plus, il y a une nette différence entre la longueur des événements dans le tissu seul, et celle dans le composite. Les événements dans le tissu seul ont une durée légèrement plus longue. Ce phénomène est dû à la présence de la résine époxy dans le composite. La résine a tendance à amortir les oscillations de l'onde engendrée par l'endommagement. La rupture de fibre est alors moins forte.

On a donc la confirmation que, par son effet d'atténuation, la résine époxy aide à renforcer le composite.

Quant aux autres matériaux, on constate que l'amplitude des événements correspondants à la rupture varie en fonction du type de matériau. On remarque que la rupture du plastique est beaucoup moins forte que le composite et les autres matériaux, mais que l'amplitude de les ondes sonores émises par la rupture du métal et du bois se rapprochent de celle du composite.

Néanmoins, lorsque l'on compare la durée jusqu'à la rupture du composite avec les autres matériaux, on constate que c'est le plastique qui est le plus proche. Le métal met plus du double de temps pour rompre, alors que le bois a besoin de quatre fois moins de temps.

Globalement, on remarque, grâce aux courbes de Pollock, qu'il y a moins d'événements dans les autres matériaux que dans le composite et le tissu seul. Ceci est sûrement dû au fait que le carbone soit sous forme de fibres, et qu'il y ait la présence de deux matériaux au sein du composite.



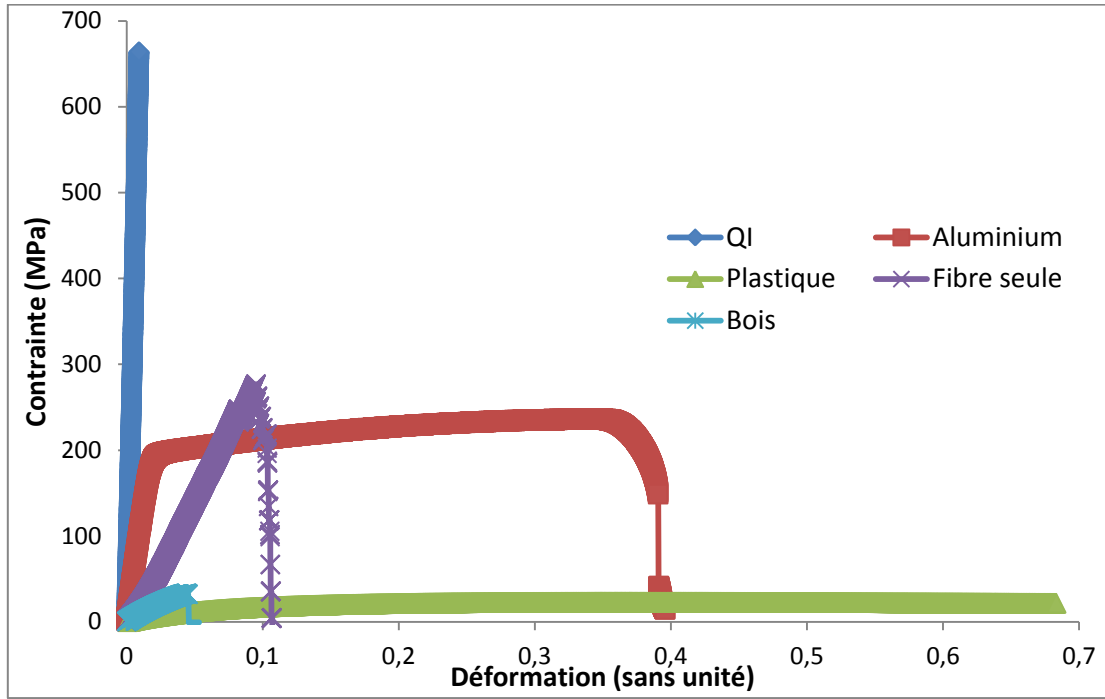


Figure 15 : courbes de traction des différents matériaux en charge à la rupture.



## 4 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans ce projet, nous avons réussi à atteindre notre principal objectif: savoir analyser une courbe issue d'essais d'émission acoustique et l'interpréter. Nous avons, au préalable, étudié la méthode d'émission acoustique utilisée dans l'industrie et des matériaux époxy.

Grâce aux recherches et aux expériences réalisées, nous avons pu obtenir des résultats intéressants concernant l'endommagement des matériaux.

De manière générale, nous avons été particulièrement autonomes sur la réalisation de ce projet. Toutefois, l'aide était nécessaire lors des expériences, à cause de la machine onéreuse et nécessitant de l'expérience.

Ce projet a été très enrichissant pour nous. Il nous a permis de renforcer nos facultés de travail de groupe. Nous avons organisé notre travail, afin que chacun puisse y contribuer. Nous avons, de même, réussi à gérer notre temps de manière à rendre ce rapport dans les délais imposés.

De plus, il nous a apporté des connaissances sur des méthodes couramment utilisées en industrie. Nous avons ainsi pris du plaisir à élargir nos connaissances sur un domaine peu accessible pour des étudiants et particulièrement intéressant.

Bien que notre objectif ait été atteint, une amélioration pourrait être apportée. Afin de pouvoir définir exactement les événements acoustiques qui surviennent lors des essais de traction, il faudrait interrompre chaque essai. En effet, interrompre l'essai et découper le matériau à un temps donné, lorsqu'un événement survient, permettrait de définir chaque signature acoustique. Nous pensons donc qu'il serait possible d'envisager un projet analysant de manière précise l'endommagement des matériaux.



## 5 BIBLIOGRAPHIE

### Livre:

**ROGOT, James.** *Essais non destructifs: l'émission acoustique, mise en œuvre et application.*

### Thèses:

**S. Barré, M. L. Benzeggagh.** *On the use of acoustic emission to investigate damage mechanisms in glass-fiber-reinforced polypropylene.* Université de Technologie de Compiègne, 20 Juin 1994.

**N. Godin, M. R'Mili, P. Reynaud, J. Lamon, G. Fantozzi.** *Emission acoustique et endommagement des composites: Intérêts et limites des techniques de reconnaissance de forme.* Université de Lyon, 2011.

**Stéphane Huguet.** *Application de classificateurs aux données d'émission acoustique: identification de la signature acoustique des mécanismes d'endommagement dans les composites à matrice polymère.* INSA Lyon, 2002.

**A. Laksimi, X. L. Gong, M. L. Benzeggagh.** *Analysis of damage mechanisms in a centrally notched glass-fiber/epoxy plate.* 24 Mars 1994.

### Encyclopédies:

**WIKIPEDIA.** *ASTM international.* [en ligne]. [http://fr.wikipedia.org/wiki/ASTM\\_International](http://fr.wikipedia.org/wiki/ASTM_International) [Mars 2013].

**WIKIPEDIA.** *Matériau composite.* [en ligne]. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau\\_composite](http://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_composite) [Février 2013].

### Article de presse:

**L'USINE NOUVELLE.** *Contrôle non destructif.* [article en ligne]. 14 Septembre 2000, L'Usine Nouvelle n°2747. <http://www.usinenouvelle.com/article/controle-non-destructif-l-emission-acoustique-fait-son-chemin-analyser-en-temps-reel-ce-qui-se-passe-dans-la-matiere-c-est-l-immense-avantage-de-l-emission-acoustique-apres-des-annees-de-developpement-l.N98635> [Février 2013].

### Documents électroniques:

**AETECH.** *Prévenir les risques industriels grâce à l'émission acoustique.* [document électronique]. [http://www.aetech.fr/\\_upload/plaquette\\_aetech.pdf](http://www.aetech.fr/_upload/plaquette_aetech.pdf) [Février 2013].

**M. RIETHMULLER.** *L'émission acoustique; application aux équipements industriels.* [document électronique]. <http://www.ndt.net/article/cofrend2008/papers/079.pdf> [Février 2013].

**LAURENT GORNET.** *Généralités sur les matériaux composites.* [document électronique]. <http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/47/02/96/PDF/MatComposites.pdf> [Mars 2013].



### Sites internet :

**EXTENDE.** *Le contrôle par émission acoustique.* [en ligne]. <http://www.extende.com/fr/rd/macsim/a-propos-de-lemission-acoustique-ae> [Mars 2013].

**RAMADAN SALAH, RIETHMULLER MATHIEU, YAACOUBI SLAH, CHAUVEAU DANIEL.** *Emission acoustique.* [en ligne]. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=23504368> [Mars 2013].

**FUTURA-SCIENCES.** *Matériau composite.* [en ligne]. [http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/physique-2/d/materiau-composite\\_2876/](http://www.futura-sciences.com/fr/definition/t/physique-2/d/materiau-composite_2876/) [Février 2013].

**UNIV-VALENCIENNES.** *Les matériaux composites dans l'industrie des sports et loisirs.* [document électronique]. Rui Pedro Carreira, Valenciennes, Juin 2005. [http://www.univ-valenciennes.fr/congres/RFIS2005/Presentations/Session7-2/RP\\_Carreira-RFIS2005.pdf](http://www.univ-valenciennes.fr/congres/RFIS2005/Presentations/Session7-2/RP_Carreira-RFIS2005.pdf) [Février 2013].

**NIEF PLASTIQUE.** *TRE.* [en ligne]. <http://www.nief-plastic.com/categories/6-r-d/104-tre> [Février 2013].

**GRALON.** *L'époxy: un matériau aux multiples applications.* [en ligne]. <http://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiels-industriels/article-l-epoxy---un-materiau-aux-multiples-applications-3536.htm> [Mars 2013].

**LAURENT VANDERMEERS.** *Composites pour l'aéronautique.* [en ligne]. [http://www.geniemeca.fpms.ac.be/Recherche/recherche\\_RTM\\_fichiers/recherche\\_rtm.htm](http://www.geniemeca.fpms.ac.be/Recherche/recherche_RTM_fichiers/recherche_rtm.htm) [Mars 2013].

**ATOMER.** *Dimensions des éprouvettes pour essais de traction selon les normes : Thermoplastiques et thermodurcis.* [en ligne]. [http://www.atomer.fr/1/1\\_dimensions-eprouvettes-essais-de-traction.html](http://www.atomer.fr/1/1_dimensions-eprouvettes-essais-de-traction.html) [Mars 2013].

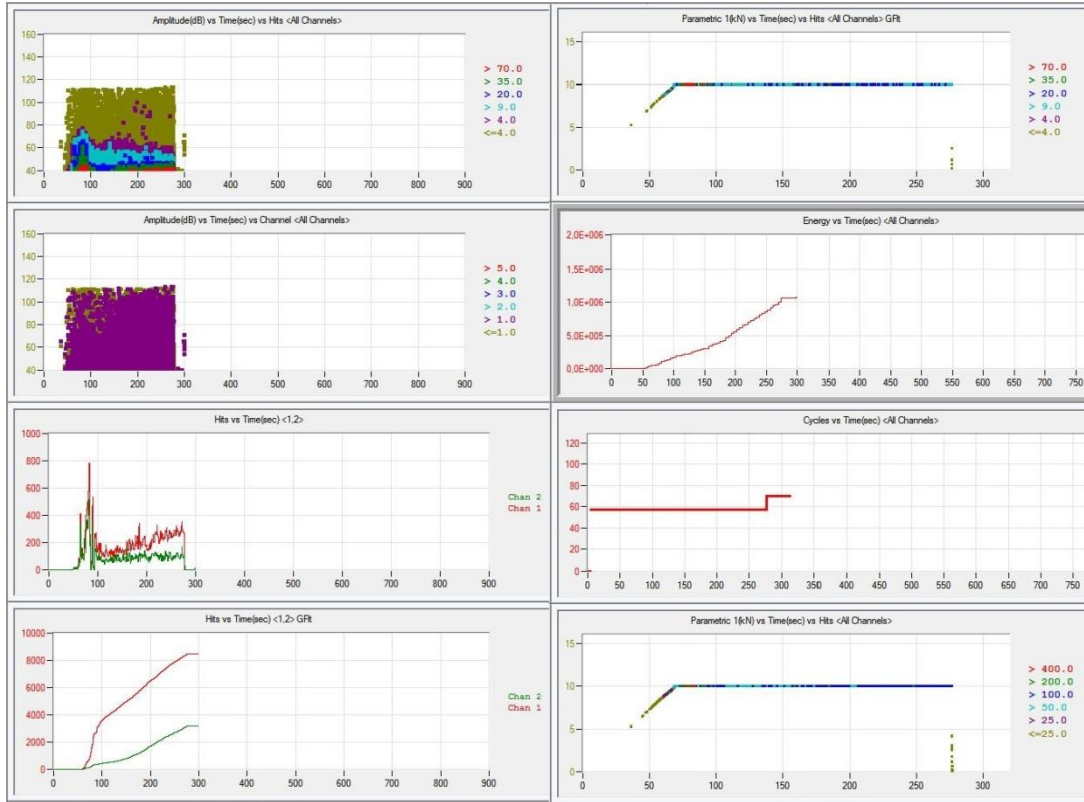
**ASTM INTERNATIONAL.** *ASTM D5083-10 Standard Test Method for Tensile Properties of Reinforced Thermosetting Plastics Using Straight-Sided Specimens, Abstract.* [en ligne]. <http://www.astm.org/search/sedl-search.html?query=%20ASTM%20D5083%20-%202010%20Standard%20Test%20Method%20for%20Tensile%20Properties%20of%20%20%20%20%20Reinforced> [Mars 2013].

**ECW.** *Emission acoustique.* [en ligne]. <http://www.ecw-walco.com/index.php/emission-acoustique> [Janvier 2013].

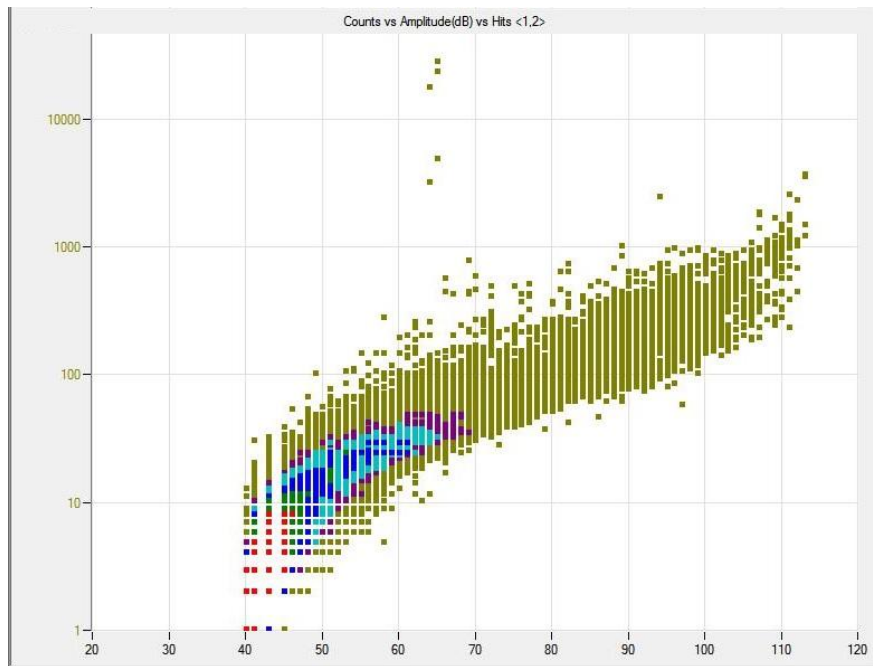


## 6 ANNEXES

### Annexe 1 : activité générale du QI en charge à la rupture.

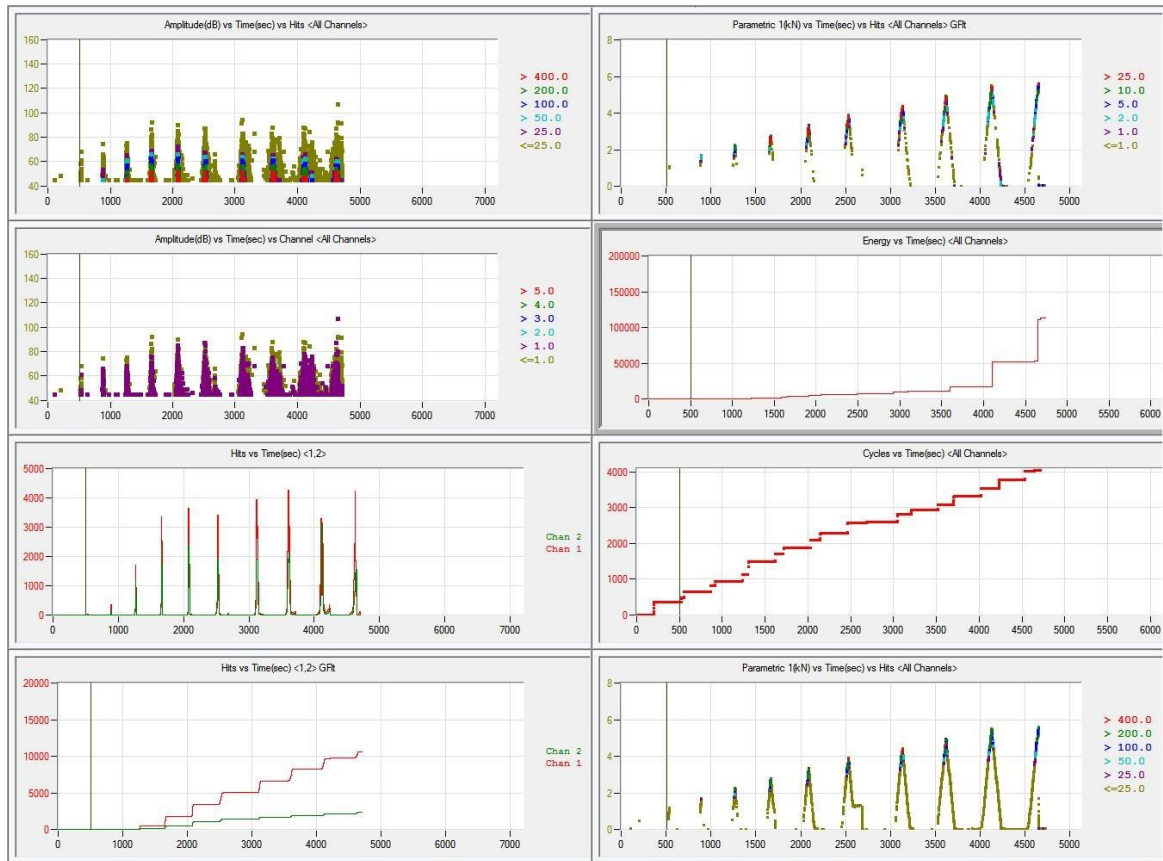


### Annexe 2 : Pollock du QI en charge à la rupture.

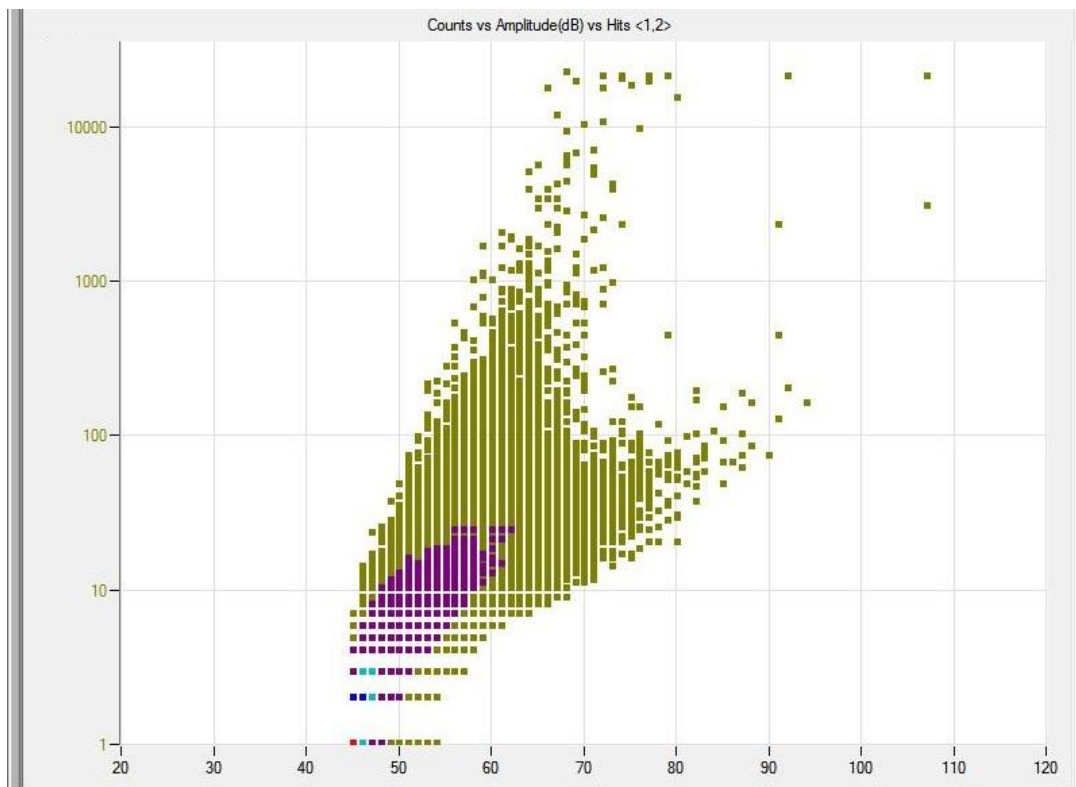




Annexe 3 : activité générale du AP en load-unload.

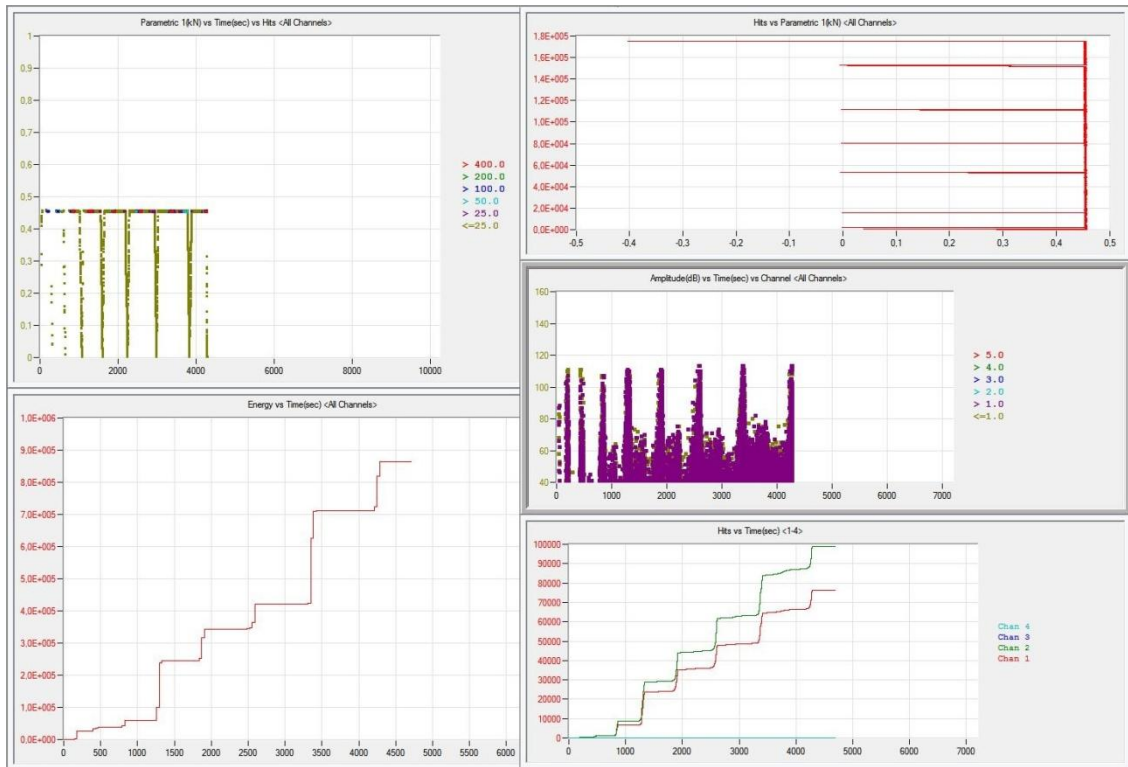


Annexe 4 : Pollock du AP en load-unload.

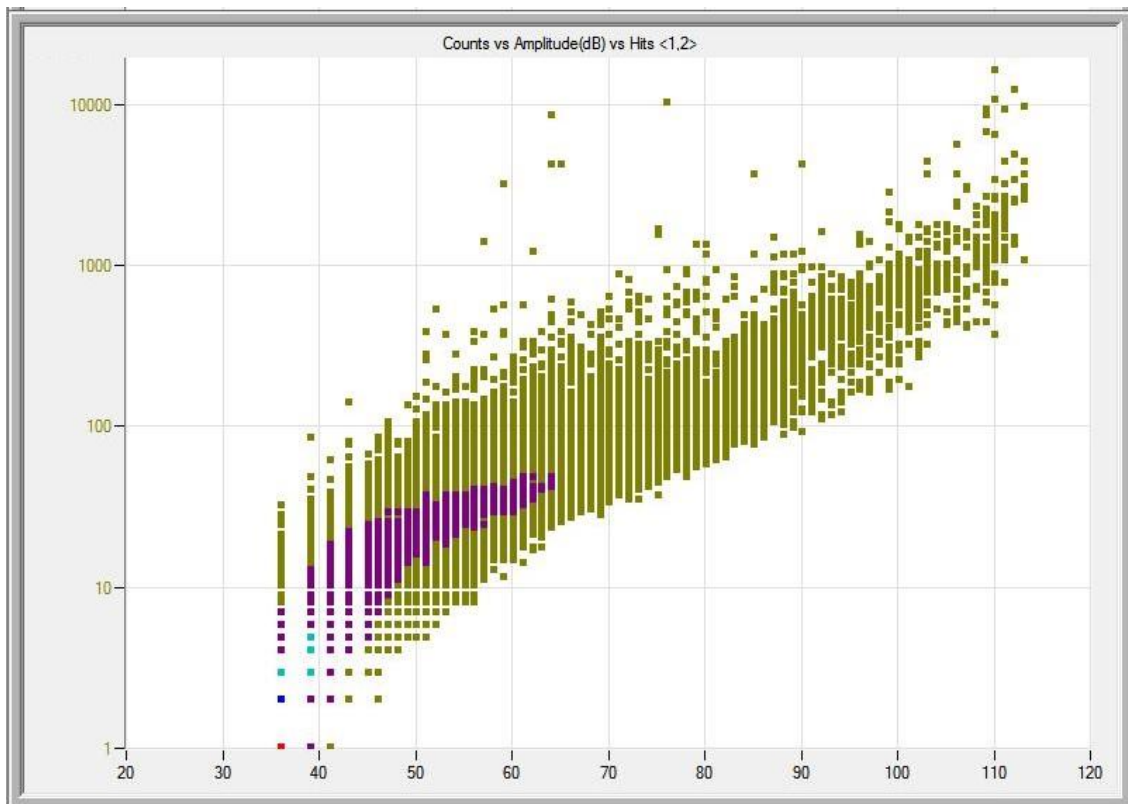




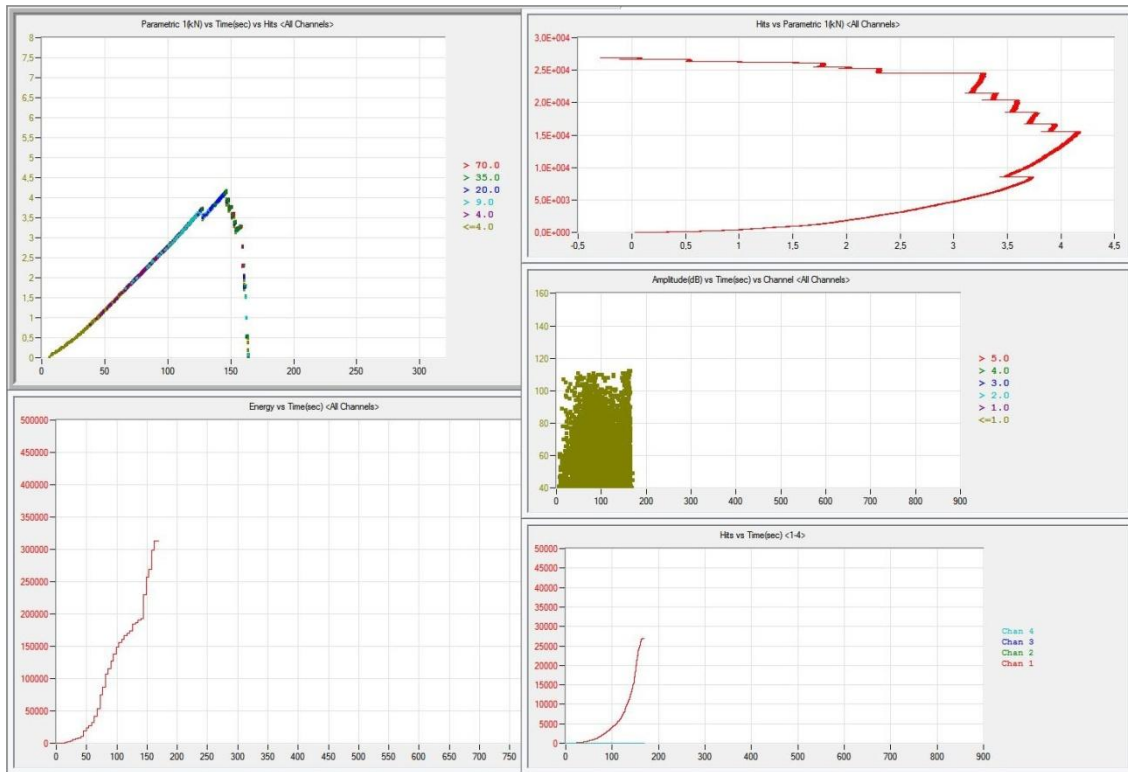
Annexe 5 : activité générale du QI en load-unload.



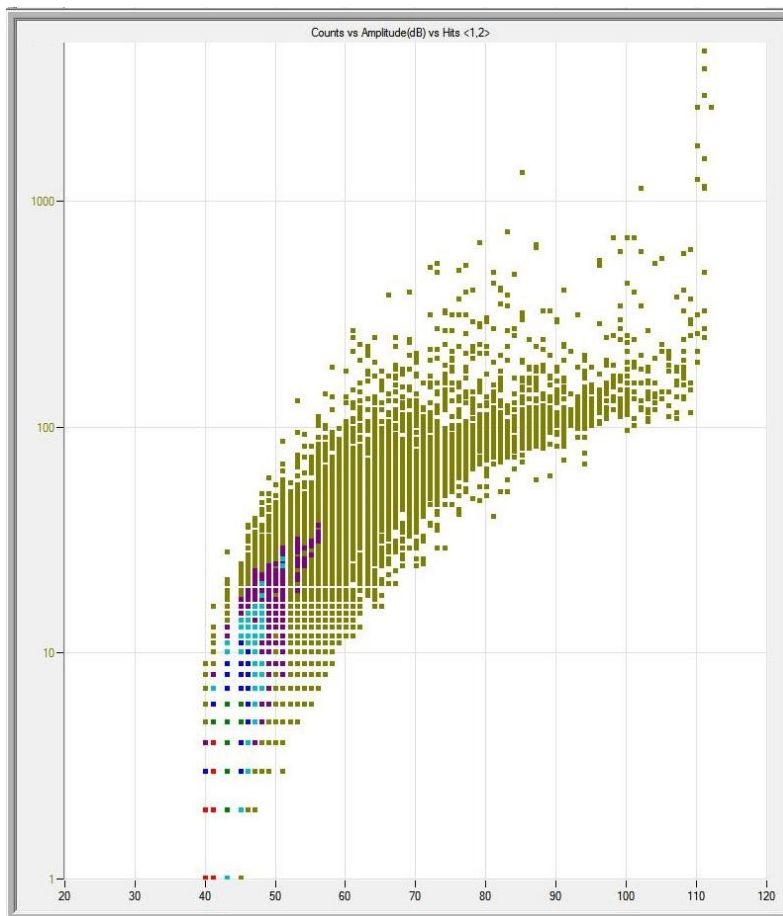
Annexe 6 : Pollock du QI en load-unload.



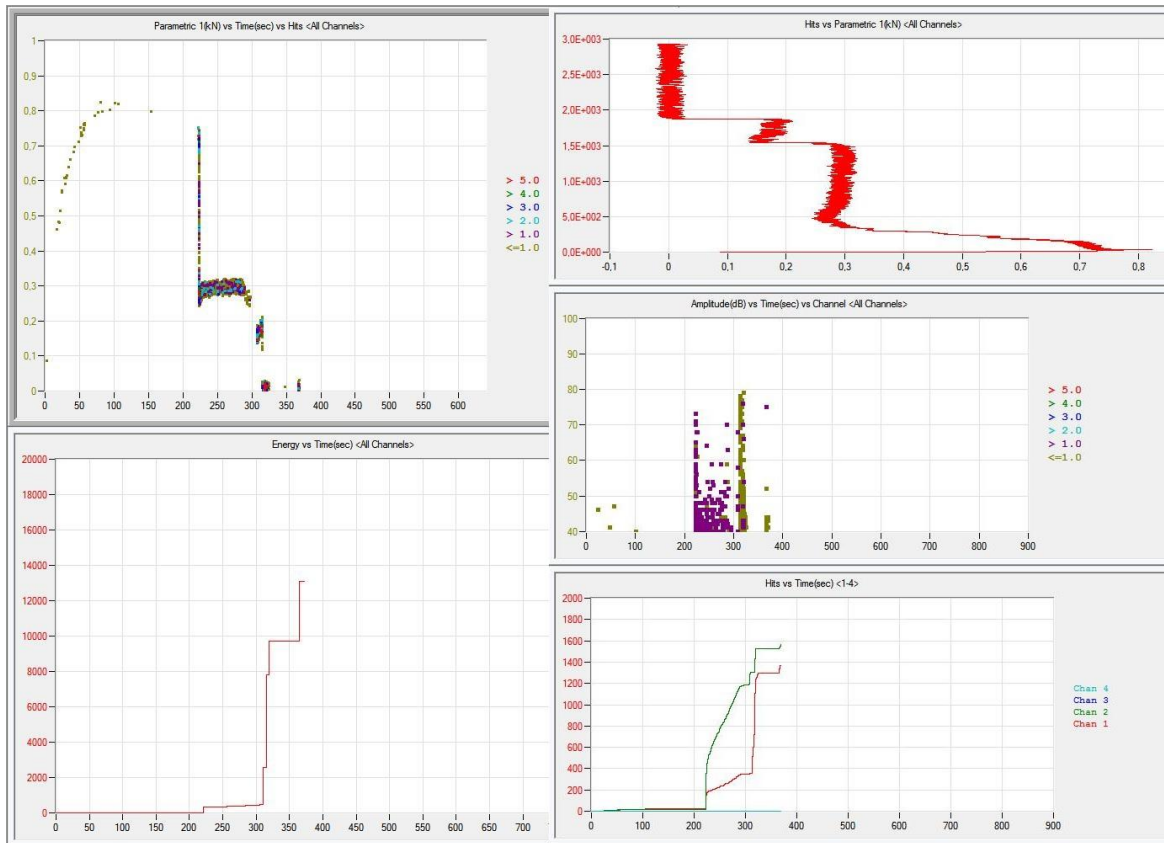
Annexe 7 : activité générale de la fibre seule en charge à la rupture.



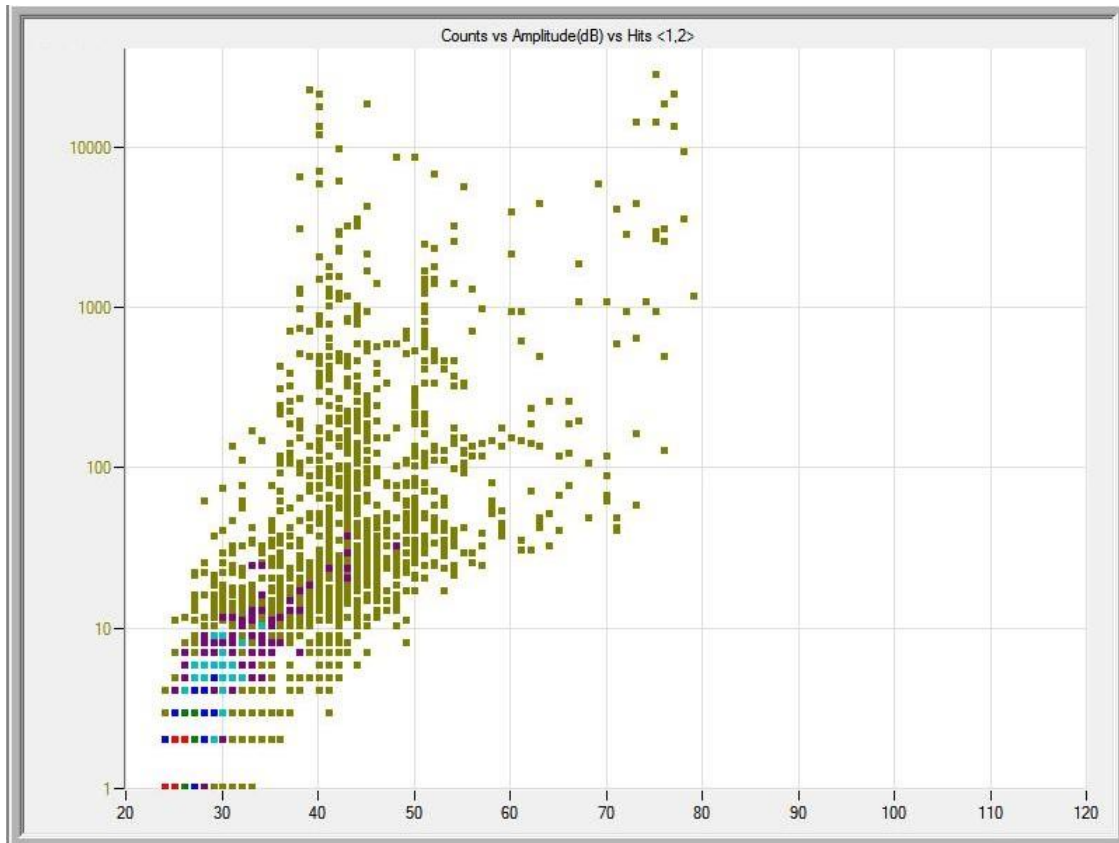
Annexe 8 : Pollock de la fibre seule en charge à la rupture.



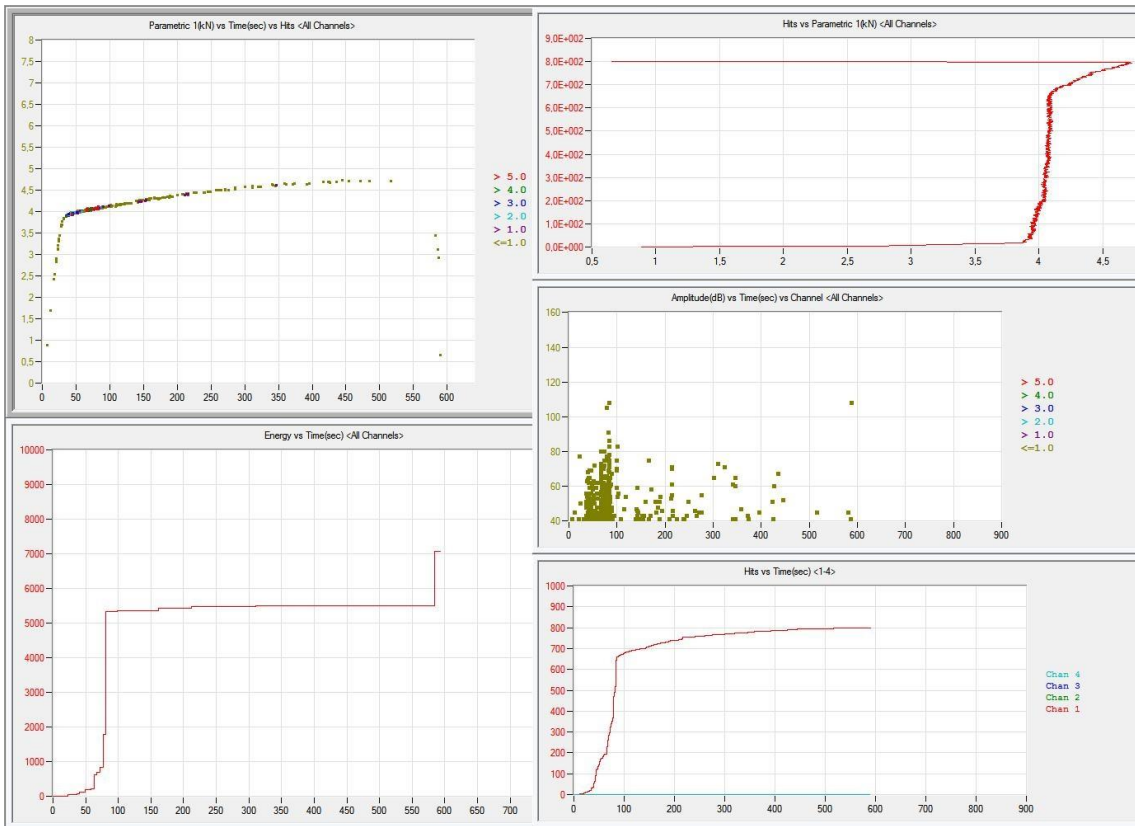
Annexe 9 : activité générale du plastique en charge à la rupture.



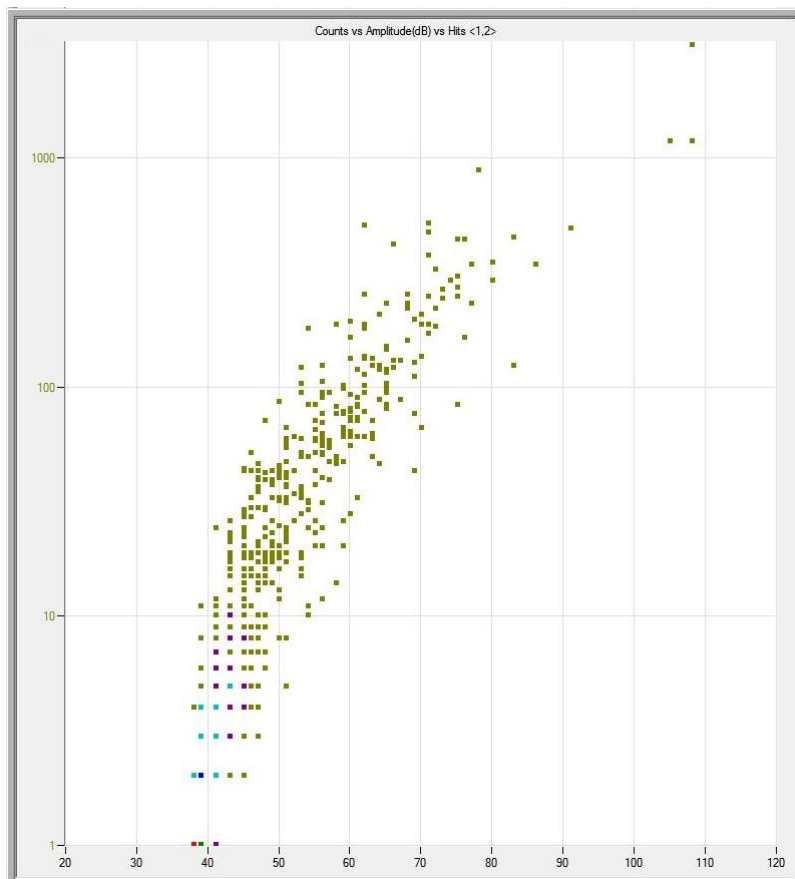
Annexe 10 : Pollock du plastique en charge à la rupture.



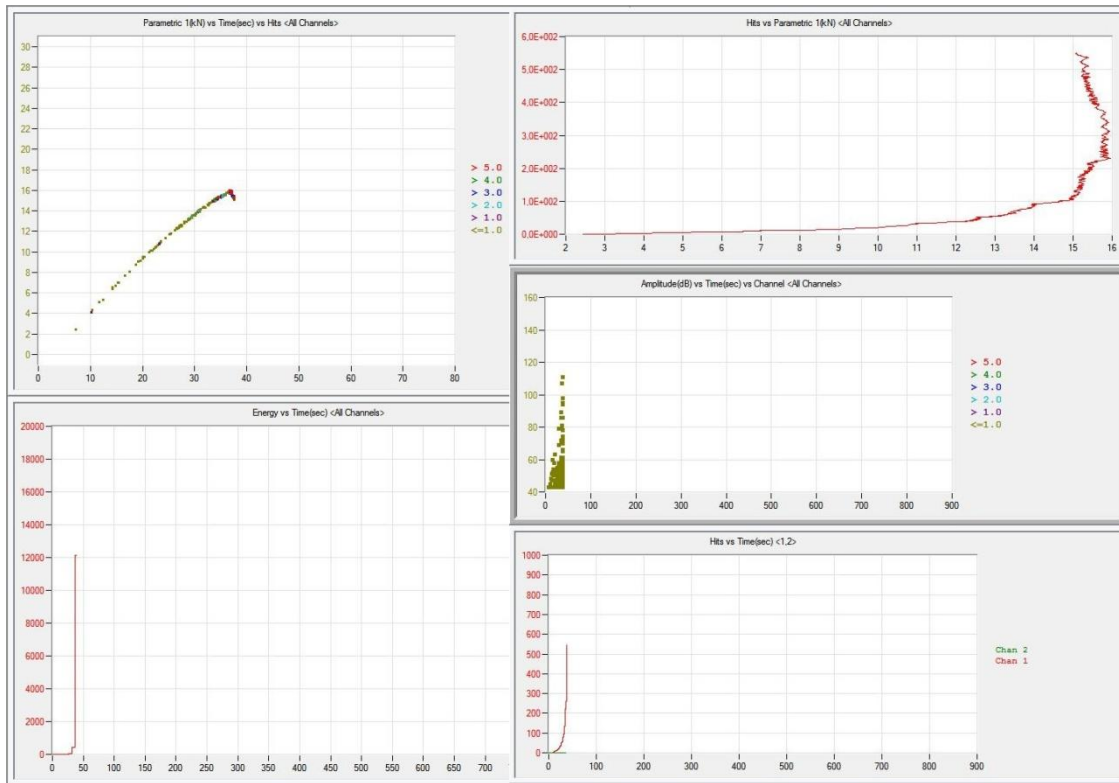
Annexe 11 : activité générale du métal en charge à la rupture.



Annexe 12 : Pollock du métal en charge à la rupture.



Annexe 13 : activité générale du bois en charge à la rupture.



Annexe 14 : Pollock du bois en charge à la rupture.

