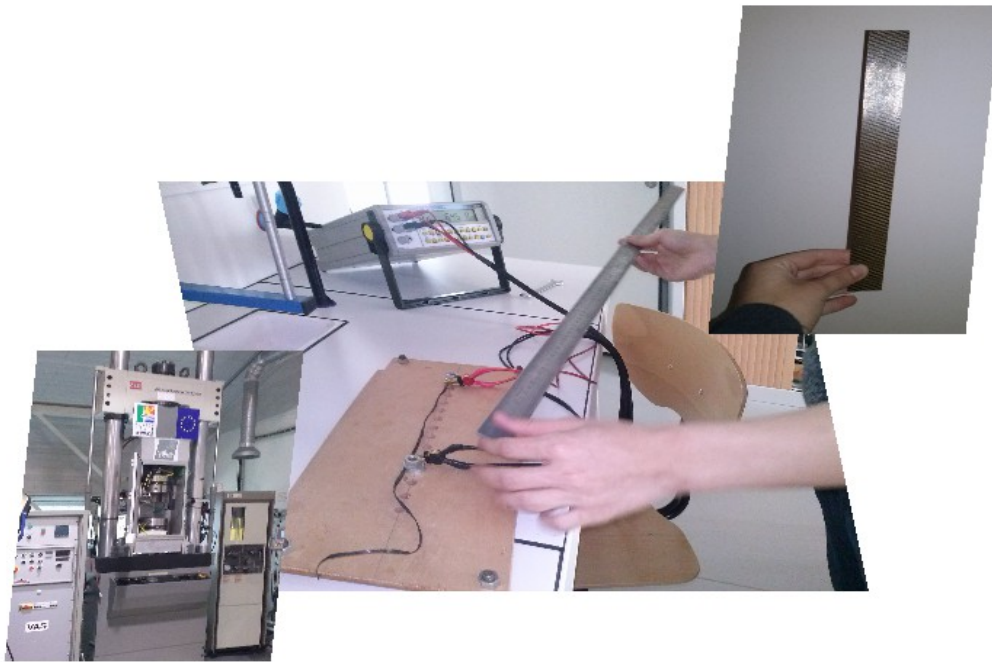


*Projet de Physique P6*  
*STPI/P6/2013\_31*

**EXPLOITATION D'UNE TECHNIQUE DE DETECTION DE  
RUPTURE DE FIBRES DE CARBONE PAR MESURE DE  
RESISTIVITE ELECTRIQUE POUR APPLICATION AUX  
MATÉRIAUX COMPOSITES**



**Etudiants :**

**Florine ASHERMAN**

**Xintian GU**

**Junzhe HAO**

**Marion MAUGER**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Benoît Vieille**



Date de remise du rapport : **13/06/2013**

Référence du projet : **STPI/P6/2013 \_31**

Intitulé du projet : ***Exploitation d'une technique de détection de rupture de fibres de carbone par mesure de résistivité électrique pour application aux matériaux composites***

Type de projet : ***Expérimental et bibliographique***

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

***Etablir le lien entre résistivité électrique et mécanisme d'endommagement, afin de pouvoir suivre l'évolution du comportement du composite carbone-époxy lors d'un essai de traction, ou lors d'autres tests de résistance du matériau.***

Mots-clefs du projet (4 maxi) : fibre de carbone, composite, résistivité, endommagement

Si existant, n° cahier de laboratoire associé : **xxx**

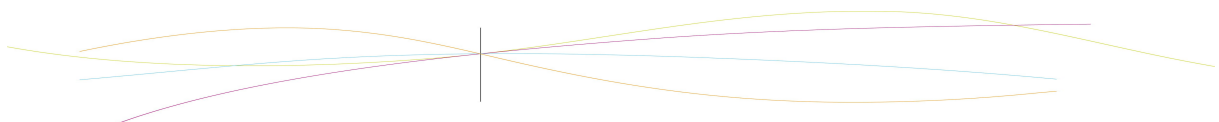
## TABLE DES MATIERES

1. Introduction.....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	7
3. Travail réalisé et résultats.....	9
3.1. Présentation générale du matériau.....	9
3.1.1. La fibre de carbone.....	9
3.1.2. La fibre de carbone dans les matériaux composites .....	10
3.1.3. Production et utilisation de la fibre de carbone .....	11
3.2. Utilisation de la résistivité électrique .....	12
3.2.1. Qu'est-ce que la résistivité électrique ?.....	12
3.2.2. Mesures expérimentales de résistivité électrique .....	14
3.2.3. Perspective pour une mesure de résistivité électrique plus précise.....	17
3.3. Mécanismes d'endommagement et résistivité électrique.....	18
3.3.1. Les mécanismes d'endommagement et de rupture chez les matériaux composites .....	18
3.3.2. Essai de traction sur une éprouvette carbone/époxy.....	19
4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES.....	23
5. BIBLIOGRAPHIE.....	24
6. ANNEXES.....	26
6.1. Mode opératoire pour la réalisation des mesures de résistivité.....	26
6.2. Tableaux des mesures expérimentales réalisées.....	28
6.3. Fiche technique de la fibre de carbone utilisée pour les expériences.....	29
6.4. Fiche technique de l'éprouvette utilisée lors de l'essai de traction .....	30
6.5. Norme ASTM D3039.....	31

## NOTATIONS, ACRONYMES

HT : High Tensile  
HTS : High Tensile Strength  
IM : Intermediate Modulus  
IMS : Intermediate Modulus Strength  
HM : High Modulus  
UHM : Ultra High Modulus

PAN : Polyacrylonitrile  
USB : Unités Structurales de Base



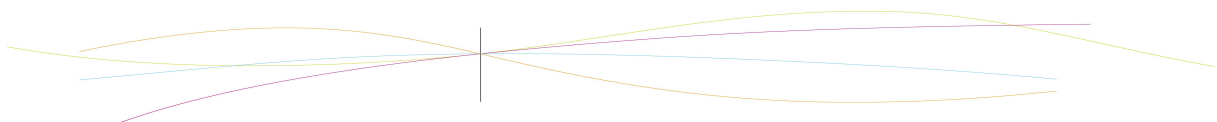
## 1. INTRODUCTION

Durant notre deuxième année de cycle préparatoire intégré à l'INSA de Rouen, il nous est demandé de travailler en groupe sur un projet de physique le temps d'un semestre. Permettant de nous initier à la gestion de travail en groupe ainsi que de découvrir de nouveaux aspects du domaine de la physique, ce projet représente un point important pour notre formation d'ingénieur.

Notre sujet porte sur l'étude d'une technique de détection de rupture de fibres de carbone par mesure de résistivité électrique pour l'application aux matériaux composites. Le but de ce projet est ainsi de déterminer le lien entre la rupture de fibres et la résistivité électrique afin de pouvoir déterminer par la suite, la présence ou non d'endommagements dans un matériau composite.

Notre projet est donc à la fois un projet bibliographique, comprenant des recherches sur l'utilisation des fibres de carbone ainsi que sur les propriétés des matériaux (résistivité électrique ou encore résistance à la contrainte), mais aussi un projet expérimental avec l'exploitation de mesures de résistivité électrique dans le matériau seul ou lors d'un essai de traction.

Dans un premier temps, nous présenterons le matériau utilisé pour notre projet, la fibre de carbone : nous verrons quelles sont ses propriétés ainsi que ses utilisations. Ensuite, nous nous intéresserons à la résistivité électrique, et cela de manière théorique puis de manière expérimentale. Enfin, nous ferons le lien entre résistivité électrique et mécanismes de rupture et d'endommagements au travers d'un essai de traction.



## 2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Etant donné que le choix de sujet de projet de physique s'effectuait suite à une enquête sur Internet selon les emplois du temps et les goûts de chacun, nous ne connaissions pas les personnes qui allaient constituer notre groupe. Néanmoins, certains d'entre nous partageaient les mêmes thématiques (CFI/MRIE pour Florine et Marion, CFI/EP pour Xintian et ASI/EP pour Junzhe), ce qui nous a permis de pouvoir parler de l'avancée de notre projet avant certains cours.

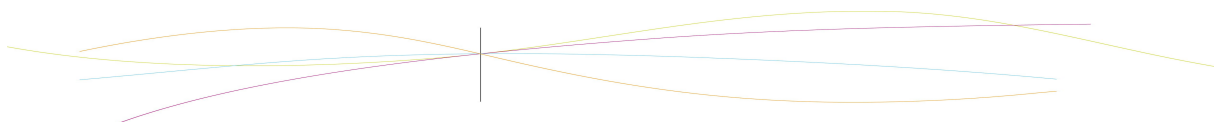
Nous avons rapidement dégagés les principaux axes de notre sujet, afin de nous répartir les recherches à effectuer, pour une plus grande efficacité. Il nous est apparu qu'une présentation du matériau était nécessaire, et les recherches sur ce sujet ont été confiées à Junzhe et Xintian, car il nous semblait que cette partie serait la plus simple à comprendre pour eux. Florine et Marion se sont occupées de tout ce qui concernait la résistivité électrique ainsi que les méthodes expérimentales. M. Vieille, notre professeur chargé du projet, nous a d'abord expliqué quelques bases concernant les propriétés mécaniques des matériaux et plus particulièrement de la fibre de carbone dans les matériaux composites. Pour nos recherches, nous avons utilisé de nombreux supports, aussi bien en français qu'en anglais : documents que M. Vieille nous avait fournis, sites Internet, emprunt de livres à la bibliothèque universitaire... De plus M. Vieille restait à notre disposition par mail si jamais nous avions des questions à lui poser ou encore pour nous envoyer des documents utiles pour notre projet.

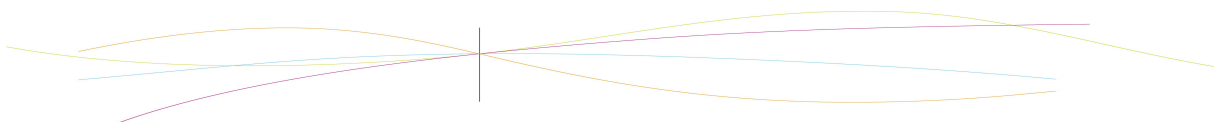
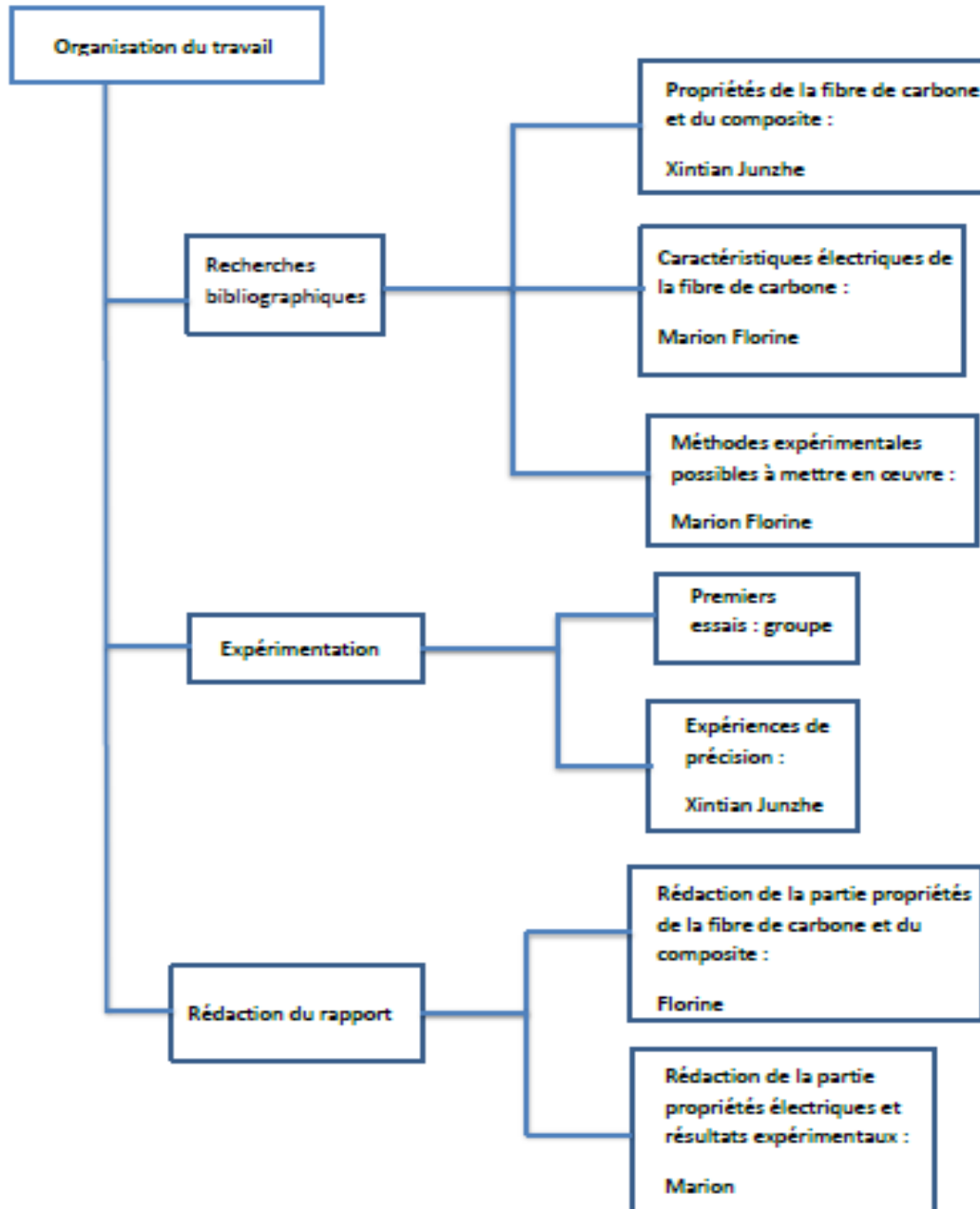
Afin de faciliter le travail de groupe, nous avons créé un google doc, sur lequel chacun de nous a publié ses recherches, ainsi que les liens pouvant être utiles pour notre sujet. Nous avons également réalisé ensemble une ébauche de plan assez rapidement, que nous avons modifié au cours de nos séances, de façon à ce qu'il corresponde le mieux à notre progression dans ce projet.

Au cours des premières séances, M. Vieille nous a emmenés en salle de TP machine, afin d'assister à un essai de traction sur une éprouvette de matériau composite carbone-époxy. Cela nous a permis de voir à quelle application concrète notre projet répondait, et donc quel parcours nous devons suivre afin de répondre entièrement à notre problématique.

Nous avons souhaité réaliser les premières mesures expérimentales ensemble, afin de s'assurer que tout le groupe comprenait bien les fondements de notre projet. Par la suite, une grande partie des mesures expérimentales (ainsi que l'exploitation de celles-ci) a été réalisée par Xintian et Junzhe, pendant que Florine et Marion travaillaient à la rédaction du rapport (étant donné que Xintian et Junzhe sont de nationalité chinoise, il nous est apparu que rédiger en français pour eux serait une tâche assez fastidieuse) ainsi qu'au traitement des données obtenues lors de l'essai de traction.

Enfin nous nous sommes répartis la création du diaporama, de sorte que chacun puisse choisir ce qu'il voulait présenter dans sa partie lors de la soutenance orale.







### 3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

#### 3.1. Présentation générale du matériau

##### 3.1.1. La fibre de carbone

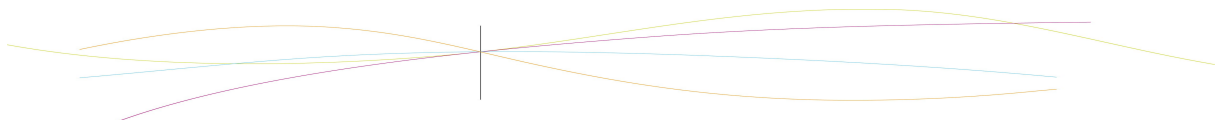
Le carbone a une résistivité de  $35 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$  à 300K et à pression atmosphérique. Cet élément est classé semi-conducteur, c'est-à-dire qu'il n'appartient ni aux conducteurs ni aux isolants car sa conductivité est intermédiaire et inférieure de deux ou trois ordres de grandeur à celle des métaux.

Les fibres de carbone sont constituées à 99% de carbone. Elles ont un diamètre compris entre 5 et 7 micromètres et sont regroupées en fils contenant jusqu'à 48 000 fibres.



figure 1 : Fibre de carbone et tissu de fibre de carbone

La fibre de carbone est principalement fabriquée à partir de PAN, un polymère permettant la cohésion d'un ensemble. Le processus se fait à très haute température. Le PAN est d'abord oxydé à l'air à environ  $300^{\circ}C$ , puis il est carbonisé à  $700$  et  $1500^{\circ}C$ . Le produit obtenu contient 90% de carbone. On effectue ensuite une graphitisation à  $3000^{\circ}C$  permettant d'obtenir une composition à 99% de carbone. Le carbone étant peu réactif, la surface est traitée après graphitisation pour permettre une meilleure adhérence de la résine plastique, lorsque la fibre est destinée à un matériau composite.



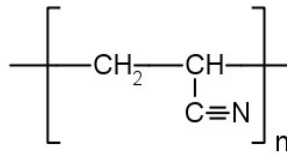


figure 2 : Polyacrylonitrile

source: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Polyacrylonitrile-PAN.png> )

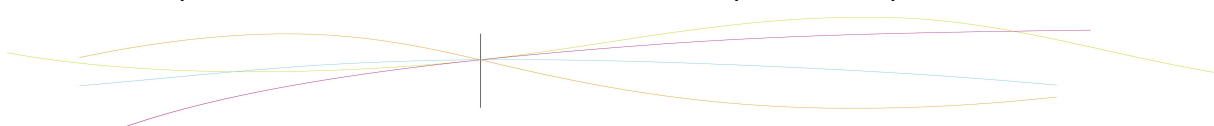
La fibre de carbone peut aussi être fabriquée à partir de brai (issu du charbon ou du pétrole). Le brais dit "isotope", dont la résistance à la rupture est faible (de l'ordre de 700 MPa), est traité par condensation à haute température. Cela conduit à un brais "mésophase" dont la résistance à la rupture est beaucoup plus importante (de l'ordre de 2 000 MPa). Cependant, après carbonisation la fibre obtenue est plus fragile et moins facile à manipuler que celle issue du PAN, c'est pourquoi, la fibre de carbone fabriquée à partir du PAN reste majoritaire sur le marché mondial, notamment pour les application au secteur aéronautique.

Il existe différents types de fibres de carbone avec différentes caractéristiques. Le tableau ci-dessous répertorie les propriétés mécaniques de mèches de fibres de carbone de différents types imprégnées par une résine :

Type de fibre	Carbone HT, type T700SC	Carbone HTS IMS : type M30SC	IM, Carbone HM, UHM : type M55J
Densité (g/cm <sup>3</sup> )	1,80	1,73	1,91
Résistance à la traction (MPa)	4900	5490	4020
Module d'élasticité en traction (GPa)	230	294	540
Allongement à la rupture	2,1 %	1,9 %	0,8 %

### 3.1.2. La fibre de carbone dans les matériaux composites

Les matériau composites à renfort fibre de carbone sont variés. Dans notre projet, nous avons spécifié notre recherche aux matériaux composites composé à 50 % de fibres de



carbone tissées et à 50% d'une résine plastique qui imprègne les fibres, telle que la résine époxy. La résine peut être thermoplastique (qui se déforme à forte température), ou alors thermodurcissable qui correspond à une polymérisation définitive, empêchant sa déformation à forte température. Dans les matériaux composites en fibre de carbone, la résine époxy est thermodurcissable, procurant ainsi au matériau des propriétés mécaniques intéressantes, et ce même à fortes températures. La résine correspond à la matrice et la fibre correspond au renfort. Le matériau est composé de plusieurs empilements de renfort tissé imprégné de résine.

Le matériau peut aussi être qualifié d'hétérogène car il n'a pas les mêmes propriétés en tout point. En effet, la matrice et la fibre de carbone apportent au matériau des propriétés différentes. Les 50% de fibres de carbone donnent au matériau des propriétés de résistance importantes lorsqu'il est sollicité. En revanche, la rigidité du carbone entraîne des ruptures et un comportement élastique fragile du matériau lorsque les fibres sont sollicitées à  $0^\circ$  (ce qui correspond aux fibres de chaîne) et à  $90^\circ$  (correspondant aux fibres de trames). Les tractions sur le composite à  $45^\circ$  montre un comportement élastoplastique plus déformable et moins résistant du matériau qui ne reprend pas sa forme initiale après traction. Ce matériau composite possède donc un comportement anisotrope, c'est-à-dire que son comportement mécanique est différent suivant les directions de sollicitation.

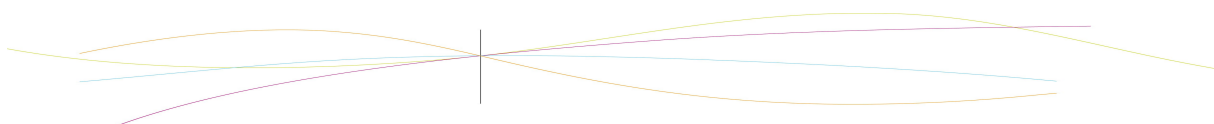
### **3.1.3. Production et utilisation de la fibre de carbone**

En 2010, la production mondiale de fibres de carbone était de 48 690 tonnes. Les principaux producteurs sont l'Amérique du Nord et le Japon. Le prix du kilogramme de fibres était de 150 euros en 1990 et a diminué petit à petit jusqu'à atteindre 15 euros le kilogramme en 2003, rendant le matériau de plus en plus abordable pour l'industrie.

La fibre de carbone a de nombreux avantages attrayants pour l'industrie du fait de sa tenue à la compression, de son inertie à la corrosion et aux agents chimiques, de sa résistance à la traction ou encore du fait de sa masse, très faible en comparaison à sa résistance. Les fibres de carbone sont souvent utilisées pour le renforcement d'un matériau composite, en raison de ses caractéristiques mécaniques.

A partir de 1968, l'industrie aéronautique commence à utiliser la fibre de carbone en tant que renfort dans un composite, car la fibre permet un gain d'énergie compte tenu de la légèreté du matériau, de sa résistance à des conditions extrêmes. L'industrie aéronautique a d'abord développé la fabrication des pales d'hélicoptères en matériau composite puis par la suite dans les composantes des avions, tel que le volet d'atterrissage, ou encore les freins d'Airbus. Actuellement les avions tels que Airbus ou Boeing font appel à 50 % de matériaux composites de fibres de carbone. Ce pourcentage devrait s'accroître dans l'avenir. L'utilisation de la fibre de carbone s'est ensuite étendue à l'industrie spatiale, notamment pour la fabrication des satellites.

Dans les années 1970, la fibre de carbone a aussi été utilisée pour fabriquer des clubs de golf ou encore des cannes à pêche. Les applications se sont petit à petit étendues à



divers domaines industriels. La fibre de carbone est dorénavant utilisée dans le génie civil, la mécanique, les transports ou encore le biomédical. Chacun de ces domaines utilise des caractéristiques précises et avantageuses de la fibre de carbone, soit en tant que composite soit en tant que fibre simple. Par exemple, la fibre de carbone est utilisée dans le biomédical pour la fabrication de prothèses, en raison de sa biocompatibilité. En revanche, sa résistance thermique, sa résistance à la fatigue et aux frottements en font un matériau intéressant pour les applications mécaniques.

### 3.2. Utilisation de la résistivité électrique

#### 3.2.1. Qu'est-ce que la résistivité électrique ?

Chaque matériau a de nombreuses propriétés. Certains appartiennent à la famille des matériaux conducteurs qui regroupe l'ensemble des matériaux ayant la capacité de conduire le courant électrique. La plupart de ces matériaux sont des métaux (cuivre, fer, zinc, ...). Le carbone quant à lui, sous forme de graphite est également conducteur, il a donc une conductivité électrique ainsi qu'une résistivité électrique. Toutefois, le carbone n'est pas aussi bon conducteur qu'un métal, et globalement sa conductivité électrique vaut  $61 \cdot 10^3 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ , soit 2 à 3 ordres de grandeur inférieure à celle des métaux.

La résistivité d'un matériau (notée rho, "ρ") est sa capacité à s'opposer à la circulation du courant. D'après sa définition, la résistivité est donc la grandeur inverse de la conductivité "σ" (qui est la capacité d'un matériau à laisser circuler le courant), d'où :

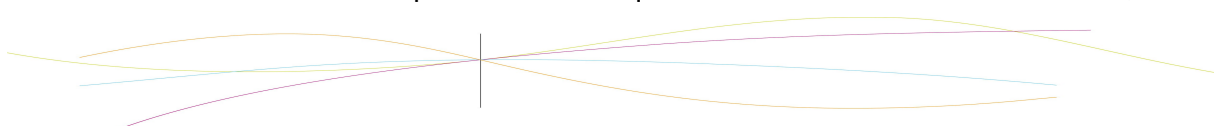
**eq 1.**  $\rho = 1/\sigma$

La résistivité électrique correspond à la résistance d'un tronçon de matériau de 1 m de longueur et de 1 m<sup>2</sup> de section et est exprimée en ohm.mètre (Ω·m).

Son expression est :

**eq 2.**  $\rho = (R \cdot S) / L$  avec : - R : résistance du matériau (Ω)  
 - S : section du matériau (m<sup>2</sup>)  
 - L : longueur du matériau (m)

La résistivité électrique du carbone seul vaut  $3,5 \cdot 10^{-5} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$ . Néanmoins, elle peut varier en fonction de différents paramètres tels que la structure de la fibre de carbone, selon



la taille des USB ainsi que la continuité axiale des soudures. L'origine de la fibre de carbone influe aussi sur la résistivité de celle-ci : par exemple, les fibres ex-brai ont une résistivité plus faible que les fibres ex-PAN.

Dans un tissu de fibres de carbone, la résistivité électrique va dépendre du nombre de torons dans le tissu (ainsi que de l'aire de celui-ci), un toron étant un paquet de fibres, mais aussi de la longueur de ceux-ci. La résine dans laquelle les fibres de carbone sont imprégnées peut également influencer la valeur de résistivité.

La résistivité électrique dépend également des endommagements que peut subir le matériau. On parle alors de piézorésistivité, qui est la variation de la résistance électrique d'une fibre due à son allongement (car lors de celui-ci, des fibres se cassent ce qui influe sur la résistivité).

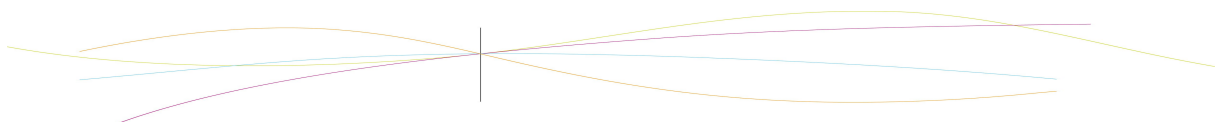
La piézorésistivité est mesurable grâce à la formule suivante :

**eq 3.**  $\Delta R/R = K \varepsilon$  où -  $\Delta R$  : variation de résistance

- R : résistance (en  $\Omega$ )
- K : facteur de jauge (en  $m^{-1}$  ; Pour une fibre de carbone, K est compris entre 2 et 5)
- $\varepsilon$  : allongement (en m)

Les semi-conducteurs (tels que le carbone) peuvent être piézorésistants, et leur variable K peut être cent fois supérieure à celle des métaux.

Mais quel est l'origine de cette piézorésistivité ? Ce phénomène s'explique par la structure même des fibres de carbone. En effet, celles-ci sont assimilées à un réseau de résistances. Lorsque l'on endommage la fibre de carbone, les fibres se cassent petit à petit. En reprenant le modèle du réseau de résistances, on obtient alors un réseau lacunaire où les zones de rupture de fibres correspondent à la suppression d'une ou plusieurs résistances. Par conséquent, on observe une variation de la résistivité : celle-ci augmente lorsqu'il y a rupture de fibres, la fibre devient donc moins bonne conductrice de courant.



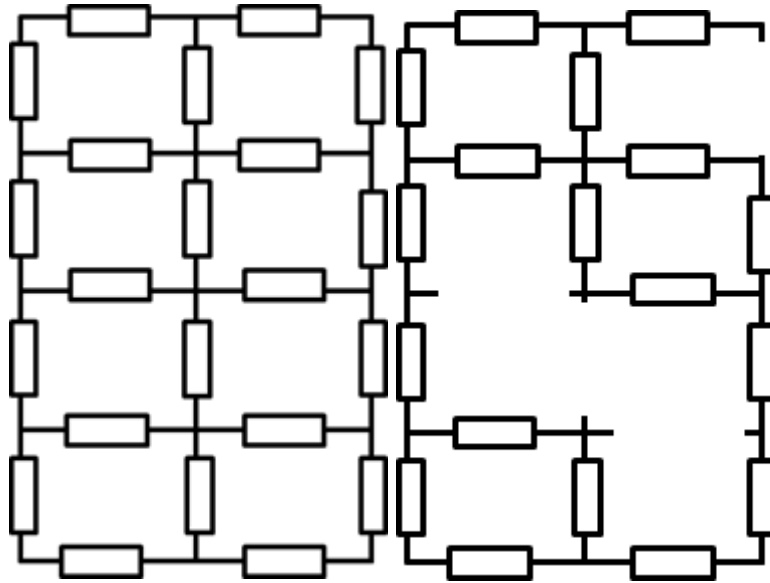


figure 3 :

Modèle du réseau de résistances avant(à gauche) et après(à droite) endommagement(s)

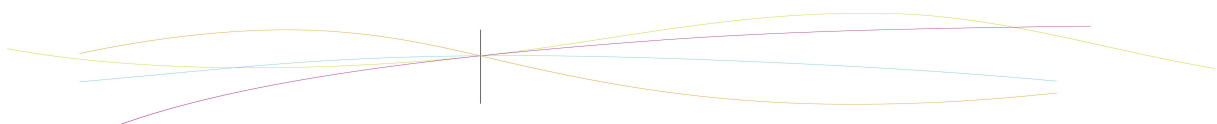
### 3.2.2. Mesures expérimentales de résistivité électrique

Afin de vérifier la valeur donnée de la résistivité électrique du carbone ainsi que d'étudier les effets d'un ou plusieurs endommagements sur la résistivité électrique, nous avons réalisé plusieurs expériences.

Expérimentalement, pour mesurer la conductivité d'une fibre de carbone, il suffit de mesurer la résistance de celle-ci à l'aide d'un ohmmètre. Grâce à la mesure de la résistance et la connaissance de la longueur ainsi que de la section de la fibre, il est possible de déterminer la résistivité à partir de la formule vue précédemment (cf eq 2).

Nous avons donc réalisé de premières mesures en plaçant deux pinces reliées à un ohmmètre sur une fibre de carbone préalablement mesurée. Néanmoins, suite à de nombreuses expériences, il nous est apparu difficile d'obtenir une valeur stable pour la résistance, qui ne cessait de varier avec une grande amplitude.

C'est pourquoi, afin de faciliter les mesures de résistance, nous avons créé un dispositif avec l'aide de M. Vieille, permettant à la fibre de carbone d'être correctement maintenue lors de la mesure. Pour cela, nous avons percé une plaque de bois à des distances différentes selon un axe commun, pour pouvoir réaliser plusieurs évaluations de la résistivité de la fibre de carbone. La fibre est serrée de part et d'autre à l'aide d'une vis et d'un boulon, ainsi que de plusieurs rondelles dans le but de la surélever pour faciliter les mesures. Une fois la fibre maintenue, les valeurs lues de la résistance sont beaucoup plus stables, et de plus, le montage permet que la fibre soit tendue afin de mesurer sa longueur plus facilement.



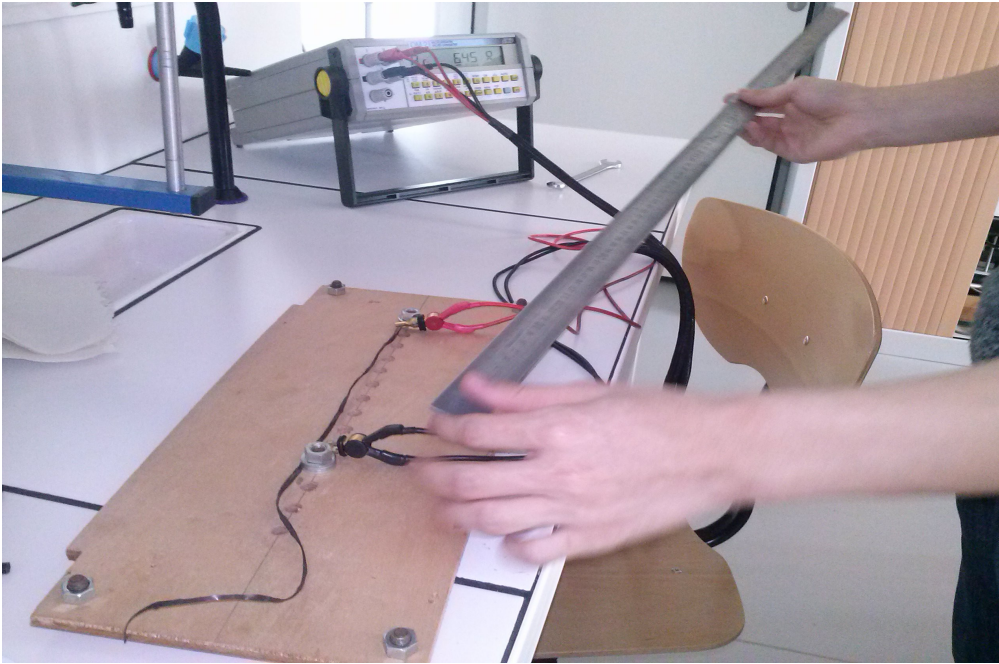


figure 4 : Montage réalisé pour les mesures de résistivité sur la fibre de carbone

Suite à une première série de mesures, nous avons obtenu le graphique suivant de la résistivité en fonction de la longueur de la fibre. Le type de fibre utilisé pour tous nos essais est la T700SC 12K 50C, dont la résistivité vaut  $1,6 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ .

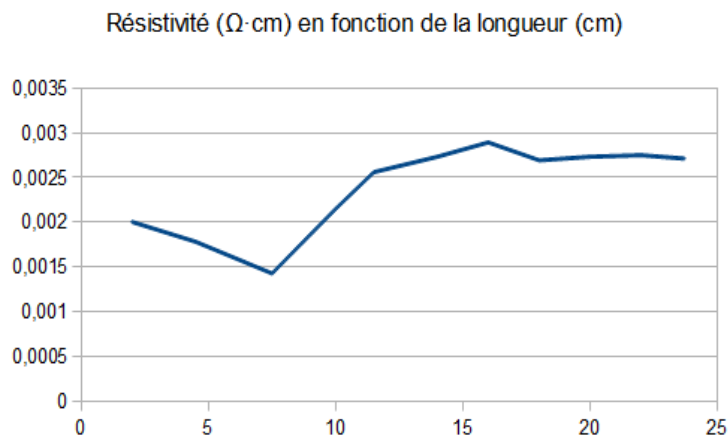
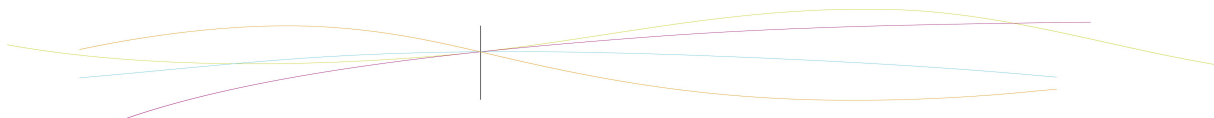


figure 5 : Graphique obtenu suite à la première série de mesures

Théoriquement, nous aurions dû obtenir une droite et non une courbe, étant donné que la résistivité est une propriété du matériau qui ne varie pas si on n'endommage pas celui-ci. On obtient des valeurs allant globalement de  $2 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  à presque  $3 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ , ce qui reste assez éloigné de la valeur théorique de  $1,6 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ .





Afin d'obtenir des résultats plus précis, nous avons effectué une nouvelle série de mesures, avec, pour chaque longueur, cinq mesures de la résistance. Cette série nous a alors permis d'obtenir des résultats plus cohérents, en calculant la résistivité moyenne pour chaque longueur.

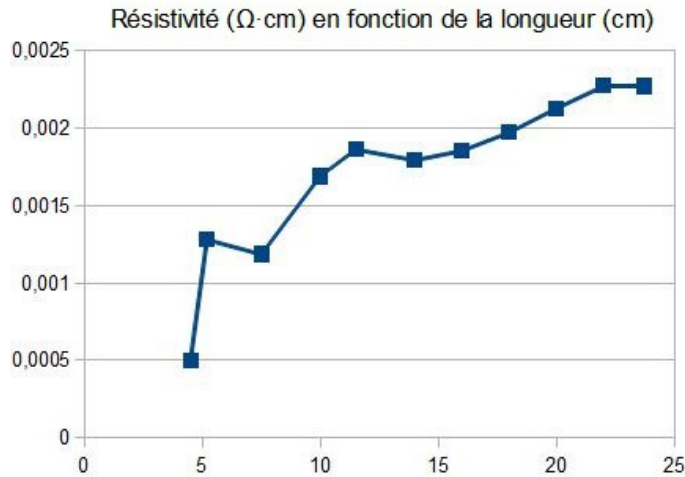


figure 6 : Graphique obtenu suite à la seconde série de mesures

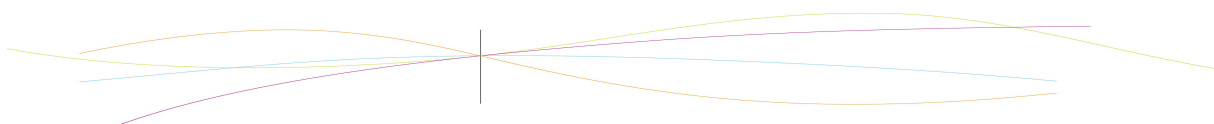
On peut tout de même constater que les trois premières mesures sont sûrement des erreurs de manipulation, puisque les autres mesures réalisées sont relativement proches les unes des autres. Cette série de mesures a permis de se rapprocher de la valeur théorique de  $1,6 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  : on a un intervalle de valeur allant de  $1,7 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$  à  $2,3 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$ .

Par la suite, nous avons souhaité mettre en évidence le lien entre endommagement et résistivité électrique. Pour cela, nous avons réalisé plusieurs entailles dans une fibre de carbone de résistivité électrique préalablement mesurée. Nous avons constaté que la résistance augmentait (et donc la résistivité aussi puisque S et L restent inchangées) quand le nombre d'endommagements augmentait. En effet, après un endommagement d'une fibre de carbone de 12 cm de longueur, la valeur initiale avant endommagement ( $\approx 22 \Omega$ ) a doublé, et après un second endommagement elle est passée à  $\approx 74 \Omega$ .

Cette expérience démontre aussi l'existence de piézorésistivité pour la fibre de carbone, car les endommagements réalisés provoquent le même effet qu'un allongement de la fibre c'est à dire une rupture du réseau de résistances.

Cependant, toute mesure réalisée de manière soignée comporte toujours une part d'imprécision. L'évaluation de l'incertitude associée à une mesure est alors indissociable de la mesure en elle-même. L'écart de mesure est l'écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle. Cet écart comprend l'erreur de mesure aléatoire (lors de la répétition de mesures d'une même grandeur par l'opérateur les valeurs obtenues peuvent être différentes) et l'erreur de mesure systématique (due à un appareil défectueux ou mal utilisé : on obtient des valeurs proches les unes des autres, cependant elles sont éloignées de la valeur réelle).

Lors de nos deux dernières expériences, nous avons réalisé cinq fois la même mesure de résistance pour chaque longueur, avec la même fibre et le même ohmmètre, sans pour autant obtenir la même valeur à chaque fois : il s'agit donc d'erreurs de mesure aléatoires,





probablement dues au positionnement des pinces. Pour nos toutes premières expériences, nous n'avions pas encore le support de fixation et nous avons remarqué que si les fils n'étaient pas posés sur un plan stable, les valeurs de résistance variaient énormément : il s'agit là d'erreurs de mesure systématiques.

Toutefois, ces erreurs de mesure peuvent être quantifiées par une incertitude de répétabilité. Pour cela, il faut d'abord connaître l'écart type de la série des n mesures indépendantes, s'obtenant de la façon suivante :

eq 4. 
$$\sigma_{n-1} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (m_k - \bar{m})^2}{n-1}}$$
 avec  $\bar{m}$  : valeur moyenne des mesures

On obtient ensuite l'incertitude de mesure grâce à cette formule :

eq 5. 
$$U(M) = k \times \frac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$$
 avec k : facteur d'élargissement  
(=2,78 pour 5 mesures)

Lors des mesures avec endommagement(s), nous avons les incertitudes suivantes, respectivement pour la mesure initiale, la mesure avec un endommagement et la mesure avec deux endommagements 0,128 ; 0,738 et 1,293.

### 3.2.3. *Perspective pour une mesure de résistivité électrique plus précise*

Une autre méthode pour mesurer la résistivité électrique est la méthode des 4 pointes. Cette méthode, requérant un peu plus de matériel, a l'avantage d'éliminer l'effet de la résistance de contact. Celle-ci repose sur l'injection d'un courant électrique dans l'échantillon à tester par le biais de deux contacts. En parallèle, la chute de tension à la surface du matériau est mesurée à l'aide de deux sondes.

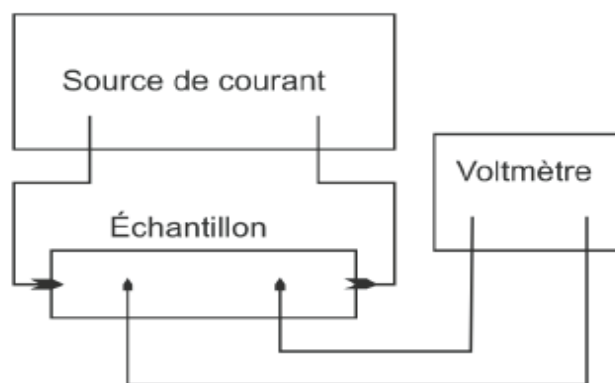
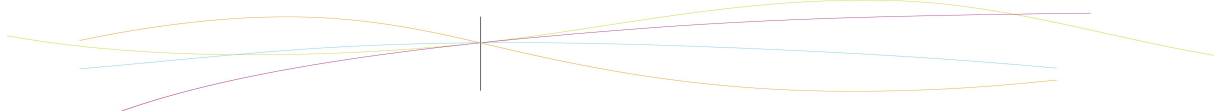


figure 7 : Schéma de la méthode des 4 pointes

Source : [http://publications.polymtl.ca/763/1/2011\\_DavidLalonde.pdf](http://publications.polymtl.ca/763/1/2011_DavidLalonde.pdf) (p.14)



Si la plaque de matériau à tester présente de faibles dimensions devant sa longueur (cas de la fibre de carbone ou du tissu de fibre que l'on peut couper de telle sorte à satisfaire ces conditions), on obtient la formule suivante :

**eq 6.**  $\rho = US / IL$  avec :

- U : chute de tension entre les sondes de mesure de tension (en V)
- A : surface perpendiculaire au passage du courant (en m<sup>2</sup>)
- I : courant circulant dans l'échantillon (en A )
- L : distance entre sonde de mesures de tension (en m)

L'ensemble de ces différentes expérimentations nous a donc permis de mieux appréhender la notion de résistivité électrique. Ainsi nous avons démontré que celle-ci est étroitement liée à l'endommagement ainsi qu'à la rupture de fibres de carbone, ce qui s'avère utile pour la réalisation de tests de résistance à la contrainte sur les matériaux composites à base de fibre de carbone.

### 3.3. Mécanismes d'endommagement et résistivité électrique

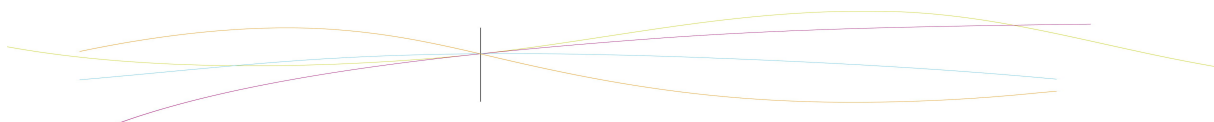
#### 3.3.1. *Les mécanismes d'endommagement et de rupture chez les matériaux composites*

Un mécanisme de rupture est un processus mécanique qui produit au sein d'un matériau une discontinuité locale de matière appelée fissure.

Dans un composite unidirectionnel , la rupture finale du matériau est due à l'accumulation de plusieurs mécanismes de base :

- la rupture de fibres
- la rupture transverse de la matrice
- la rupture longitudinale de la matrice
- la rupture de l'interface fibre-matrice.

Lorsqu'un matériau composite unidirectionnel est soumis à des sollicitations mécaniques, les fibres contenues dans celui-ci peuvent se rompre. Pour cela, il faut que la contrainte de traction  $\sigma_f$  dans une fibre atteigne la contrainte à la rupture  $\sigma_{fu}$  de la fibre. Suite à cela, une concentration de contraintes au voisinage de la rupture est observable. Une redistribution de ces contraintes va alors s'effectuer, et ce selon divers paramètres tels que la contrainte à la rupture des fibres, la capacité de la matrice à absorber l'énergie préalablement libérée, ou encore les propriétés de l'interface fibre-matrice.



Quand un composite unidirectionnel est soumis à une traction longitudinale, l'initiation de la rupture s'effectue de deux manières différentes :

- par rupture de fibres (quand la déformation à la rupture des fibres est plus faible que celle de la matrice, c'est à dire  $\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$ )
- par rupture transverse de la matrice dans le cas contraire (cas où  $\epsilon_{mu} < \epsilon_{fu}$ ).

De manière générale, on retient la formule suivante pour la contrainte à la rupture du composite, qui correspond à la loi des mélanges :

**eq 7.** 
$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} V_f + \sigma_{mu} (1 - V_f)$$
 avec : -  $\sigma_{cu} / \sigma_{fu} / \sigma_{mu}$  contraintes à la rupture  
 du composite / de la fibre/ de la matrice  
 -  $V_f$  : fraction volumique de fibres  
 ( $= V_{(fibres)} / V_{(composite)}$ )

### 3.3.2. Essai de traction sur une éprouvette carbone/époxy

Comme de nombreux matériaux composites, les fibres de carbone sont intégrées à des matériaux utilisés quotidiennement dans plusieurs domaines, ce qui augmente les besoins d'essais des composites (essai de traction, essai de résistance aux chocs, essai de résistance à haute température). Ces essais servent à garantir que ces matériaux sont sûrs et adaptés lorsqu'ils sont intégrés aux produits finaux, mais également de connaître précisément les capacités techniques de chaque matériau, ce qui permet lors de la conception d'un objet de choisir les matériaux les plus adaptés à l'utilisation de cet objet. Un des tests que l'on peut effectuer est l'essai en traction longitudinale grâce à une machine à traction servohydraulique de la marque MTS, présente dans les locaux de l'INSA de Rouen, dans une salle de TP du département Mécanique.

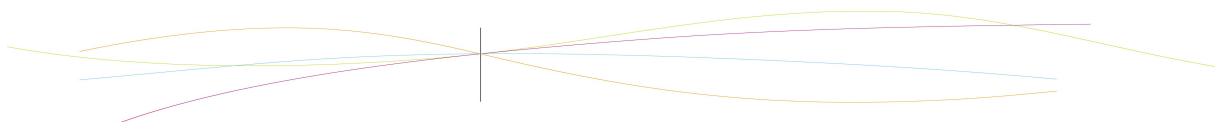




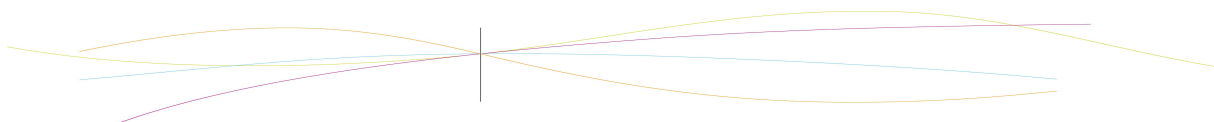
figure 8 : Machine à traction servohydraulique

Pour les essais de traction, l'éprouvette à tester peut avoir deux géométries différentes : elle peut soit être en forme d'haltères, soit droite avec des talons. Ces éprouvettes sont plates, et la longueur de la section utile est le plus souvent supérieure d'un ordre de grandeur à la largeur.

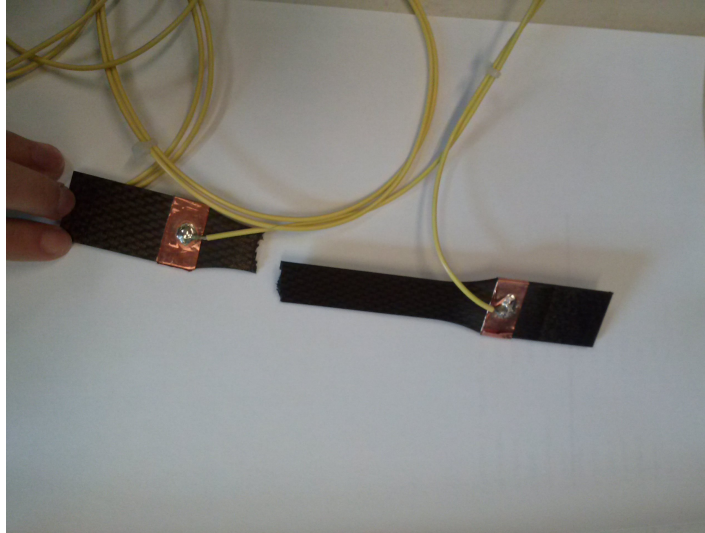
En général, la charge est appliquée sur les têtes de l'éprouvette grâce à des mâchoires auto-serrantes, afin que les contraintes soient réparties de manière homogène dans l'éprouvette. Avant d'effectuer l'essai de traction longitudinale, il faut s'assurer que la direction de la charge appliquée soit alignée avec la direction des fibres. Dans le cas contraire, pour un composite unidirectionnel, on obtiendrait des valeurs expérimentales du module d'Young plus faibles que les valeurs réelles de celui-ci.

Pour assurer la précision des mesures, il faut donc respecter certaines normes. La norme utilisée est une norme ASTM (organisme de normalisation réalisant des normes pour les matériaux entre autres). Il faut alors suivre les directives de la norme D3039, tel que s'assurer que le matériau à tester soit en bon état (regarder si les fibres sont bien alignées et si l'éprouvette n'est pas abîmée), connaître les conditions de l'environnement dans lequel la manipulation est effectuée (température par exemple) ou encore bien installer les pinces qui maintiennent l'éprouvette pendant l'expérience.

Lors de l'essai de traction, l'éprouvette est exposée à une force l'étirant de haut en bas. Cette force va causer la rupture des fibres, précédant la rupture de l'éprouvette. Durant cet essai, on peut réaliser une acquisition de données variées. Par exemple, il est possible



de mesurer l'allongement au cours du temps (soit directement grâce à la machine, soit à l'aide d'un extensomètre plus précis que la machine, on encore par le biais de jauges d'extensométrie pour des mesures encore plus précises des déformations) ou la résistance électrique au cours du temps à l'aide de câbles soudés sur l'éprouvette.

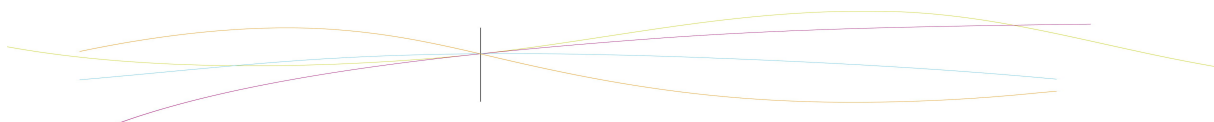


*figure 9 : Eprouvette utilisée suite à l'essai de traction*

*(câbles jaunes servent à la mesure de la résistance)*

On connaît également à chaque instant la force à laquelle l'éprouvette est soumise, ce qui permet ainsi de déterminer par la suite pour quelle valeur la rupture va se produire. Nous avons donc exploité ces deux caractéristiques mesurables lors de notre essai afin de prouver le lien entre résistivité électrique et endommagements.

Voici le graphique que nous avons obtenu suite au traitement des données obtenues :



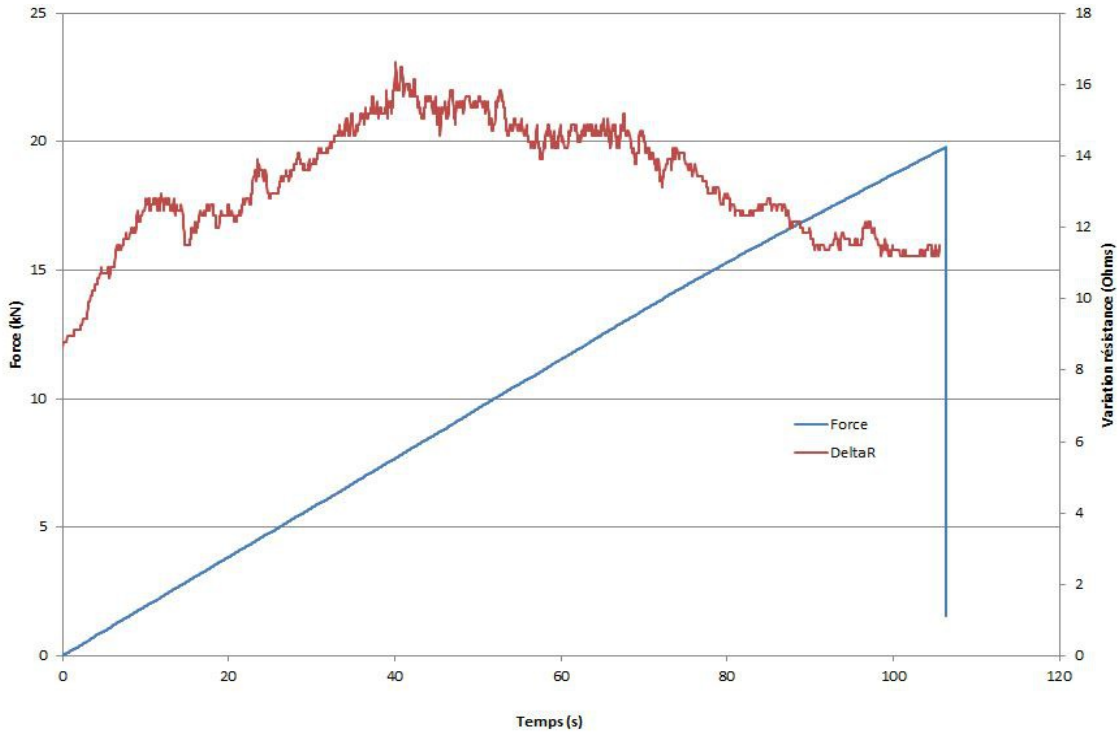
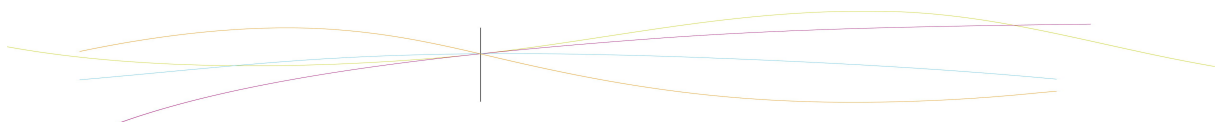


figure 10 : Evolutions de la force et de la variation de résistance en fonction du temps

Expérimentalement, on peut observer que la rupture de l'éprouvette a lieu pour une force environ égale à 20 kN, comme le montre la courbe bleue, représentant l'évolution de la force appliquée en fonction du temps, qui devient verticale pour cette valeur. Quant à la courbe rouge, elle représente la variation de résistance en fonction du temps. On remarque que cette variation est de plus en plus importante au cours du temps, avec la présence de pics. Ces pics traduisent une plus grande variation de résistance pour un intervalle de temps donné, et donc une plus grande variation de résistivité : cela signifie qu'on a eu de plus grandes modifications dans le réseau de résistances formé par les fibres de carbone, et donc un nombre d'endommagements plus important dans l'éprouvette.

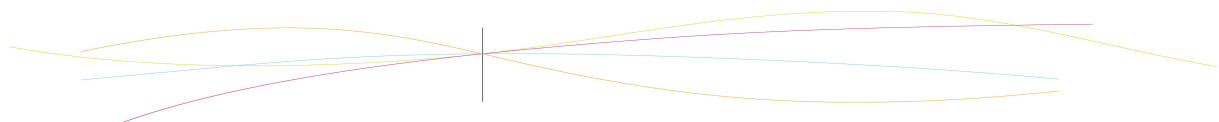


#### 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

En conclusion de ce rapport, grâce à ce projet de physique, nous avons pu découvrir un autre domaine de la physique. Nous nous sommes ainsi familiarisés avec l'utilisation de la fibre de carbone, ses propriétés intéressantes pour divers secteurs industriels ainsi que les méthodes de détection de rupture de fibres. Cela nous a permis d'enrichir notre culture scientifique et de nous intéresser à des applications physiques qui nous étaient jusque là inconnues. Ce projet a aussi été une opportunité pour nous initier au travail d'équipe et à l'organisation du travail de groupe. Cet aspect du projet est un point très important dans notre formation au métier d'ingénieur, dans lequel le travail de groupe est indispensable.

Afin de mener à bien notre projet, nous avons mis en place une démarche scientifique en trois temps. Dans un premier temps nous avons eu une approche théorique du sujet. Dans un second temps, nous avons mis en place un dispositif expérimental pour observer les effets électriques de la rupture de fibre, enfin nous avons analysé ces données expérimentales. Nous avons ainsi constaté que la détection de rupture de fibres de carbone par mesure de la résistivité électrique est une méthode intéressante pour savoir si le matériau a été endommagé grâce à des valeurs de référence. Cette méthode permet aussi de connaître les limites mécaniques du matériau avant sa rupture.

Cependant, cette technique ne permet pas par exemple de localiser avec précision la zone de rupture ou de quantifier avec précision le nombre de ruptures. D'autres méthodes de détection de rupture de fibres de carbone sont utilisées, comme la détection par émission acoustique, plus complexe, permettant non seulement de détecter l'endommagement des fibres de carbones, mais aussi de les localiser.





## 5. BIBLIOGRAPHIE

### Livres/documents

BERTHELOT Jean-Marie, "Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures", *Lavoisier*, 2012.

### Sites internet

Les semis conducteurs

[f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM23/RM23D/RM23D05.html](http://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM23/RM23D/RM23D05.html)(valide à la date du 12/06/2013)

Propriétés de différents types de fibres de carbone seules

[f3news.big-forum.net/t1936-proprietes-des-materiaux-composites](http://f3news.big-forum.net/t1936-proprietes-des-materiaux-composites)(valide à la date du 12/06/2013)

Caractéristiques de la fibre de carbone et applications industrielles

[www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/textiles-traditionnels-et-textiles-techniques-42572210/fibres-de-carbone-am5134/](http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/textiles-traditionnels-et-textiles-techniques-42572210/fibres-de-carbone-am5134/) (valide à la date du 12/06/2013)

Production et consommation de la fibre de carbone dans le monde  
[www.societechimiquedefrance.fr/extras/donnees/mater/fibres/textfib.htm](http://www.societechimiquedefrance.fr/extras/donnees/mater/fibres/textfib.htm) (valide à la date du 12/06/2013)

Mesures et modélisation des endommagements dans les composites stratifiés, Yann GELEBART

<http://ygelebart.free.fr/index.php/fr/3A/11> (valide à la date du 12/06/2013)

Prédiction des propriétés électriques d'un composé aéronautique, Arnaud GILLET, Philippe OLIVIER, Abir AL MAGRHRIBI et Ihab EL SAWI

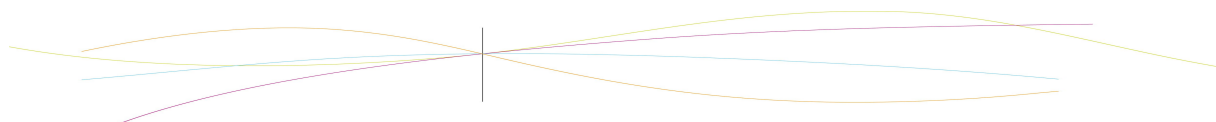
<http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/43/05/77/PDF/500b.pdf> (valide à la date du 12/06/2013)

Résistance électrique, techniques expérimentales

<http://bibli.ec-lyon.fr/exl-doc/jjellid.pdf> (valide à la date du 12/06/2013)

Fiche technique de la fibre de carbone T300

<http://www.toraycfa.com/pdfs/T300DataSheet.pdf> (valide à la date du 12/06/2013)





La fibre de carbone, Jean LUYCKX

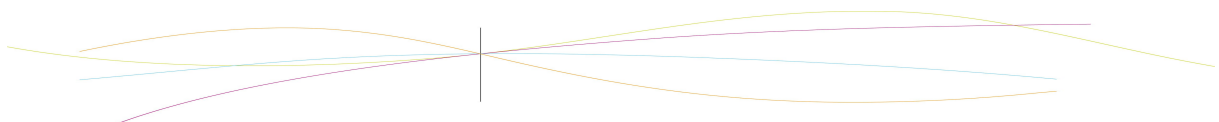
[http://www.patrick-roch.com/ingemeca/docs/\\_genie\\_mecanique/Mat%E9riaux/Plastiques%20et%20composites/Composites/Charges%20et%20fibres%20de%20renforcement/Fibres%20de%20carbone.pdf](http://www.patrick-roch.com/ingemeca/docs/_genie_mecanique/Mat%E9riaux/Plastiques%20et%20composites/Composites/Charges%20et%20fibres%20de%20renforcement/Fibres%20de%20carbone.pdf) (valide à la date du 12/06/2013)

La résistivité électrique

<http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9sistivit%C3%A9> (valide à la date du 12/06/2013)

La piézorésistance

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Pi%C3%A9zor%C3%A9sistance> (valide à la date du 12/06/2013)

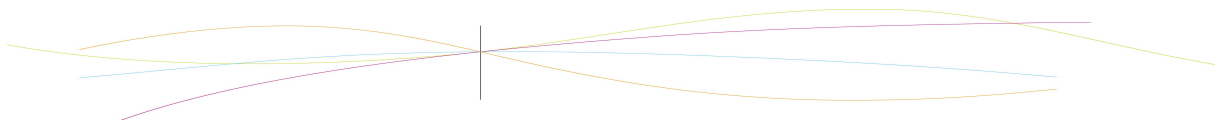
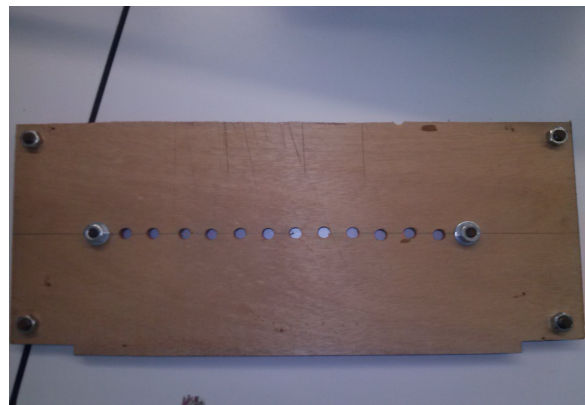
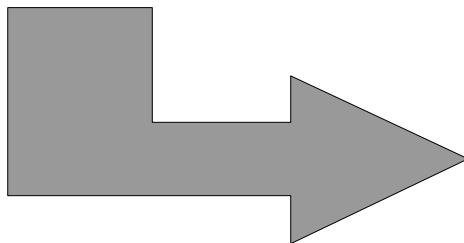


### 6.1. Mode opératoire pour la réalisation des mesures de résistivité

- Matériel nécessaire :
- Ohmmètre avec câbles disposant de petites pinces
  - Fibre de carbone
  - Règle graduée
  - Support de fixation pour la fibre de carbone

#### Réalisation du support de fixation

Afin de maintenir la fibre de carbone et faciliter les mesures de résistivité, la réalisation d'un support de fixation est un moyen simple et peu coûteux d'améliorer la qualité des mesures effectuées. Pour cela, on coupe une planche de bois de la longueur que l'on souhaite (selon les mesures que l'on veut effectuer), et de largeur telle que l'on puisse percer des trous à l'aide d'une perceuse à colonne sur l'axe médian de cette planche. Ces trous seront alignés et espacés d'un même intervalle. On perce également les quatre coins de la planche afin d'y visser une vis et un boulon pour la surélever.



Enfin, on place une vis, un boulon et plusieurs rondelles dans chacun des deux trous choisis pour réaliser la mesure.

### Réalisation des mesures

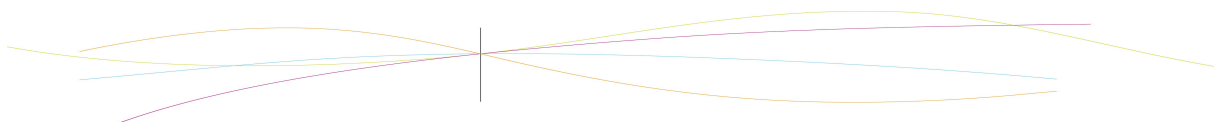
- 1) Couper une longueur de fibre de carbone suffisamment longue pour l'ensemble des mesures
- 2) Fixer la fibre de carbone pour la longueur choisie : s'assurer qu'elle soit bien fixée, tout en faisant attention à ne pas trop l'abîmer, ce qui pourrait fausser les mesures. Faire attention également avec la manipulation de la fibre de carbone, car celle-ci peut couper légèrement ou donner des échardes.
- 3) Mesurer avec la règle graduée la longueur exacte de la fibre entre les 2 vis (même si l'on a percé à intervalles réguliers, il faut mesurer pour plus de précision !! ). Noter cette longueur.
- 4) Réaliser successivement 5 mesures de la résistivité, en enlevant à chaque fois les pinces de la fibre de carbone. Noter les 5 valeurs obtenues. Lors des mesures, il faut s'assurer que la résistivité soit plutôt stable, que les pinces prennent bien toute la fibre (essayer de les placer à la même position entre chaque mesure) et que les câbles reliant les pinces à l'ohmmètre soient stables (l'idéal étant qu'ils soient posés sur une surface fixe, et que l'on n'y touche pas pendant les mesures).
- 5) Répéter les étapes 2 à 4 pour chaque longueur de fibre choisie.

### Exploitation des mesures

Noter sur Excel sous forme de tableau les résultats obtenus. Calculer la résistivité moyenne pour chaque longueur. Calculer ensuite la résistivité en utilisant la formule  $\rho = (R \cdot S) / L$ , en remplaçant R et L(cm) par les valeurs expérimentales, et en prenant  $S = 0.00729 \text{ cm}^2$ .

Remarque : La résistivité sera alors obtenue en  $\Omega \cdot \text{cm}$  et non pas en  $\Omega \cdot \text{m}$ .

Tracer ensuite la courbe  $f(L) = \rho$ . Théoriquement, on devrait obtenir une droite parallèle à l'axe des abscisses, et d'ordonnée égale à la valeur de la résistivité propre au type de la fibre de carbone, donnée par le fournisseur.



## 6.2. Tableaux des mesures expérimentales réalisées

### Premier essai sur la fibre de carbone

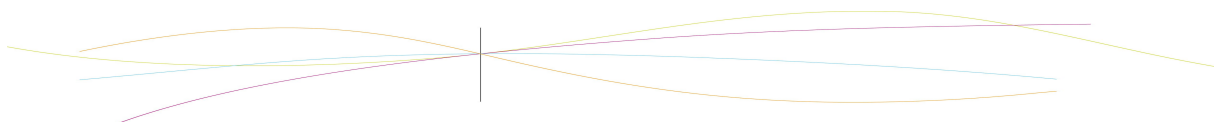
L0	R	Ro=(R*S)/Lo
2	0,55	0,00200475
4,5	1,1	0,001782
7,5	1,47	0,00142884
10	2,95	0,00215055
11,5	4,04	0,0025610087
14	5,25	0,00273375
16	6,35	0,0028932188
18	6,65	0,00269325
20	7,5	0,00273375
22	8,3	0,0027503182
23,7	8,82	0,0027129873

### Second essai sur la fibre de carbone (5 mesures de R)

R moyenne	7,372	6,852	5,828	4,862	4,064	3,438	2,934	2,316	1,218	0,912	0,308
L	23,7	22	20	18	16	14	11,5	10	7,5	5,2	4,5
$\rho = \frac{R}{L} * S$ moyenne	0,00226759	0,0022705036	0,002124306	0,00196911	0,00185166	0,0017902157	0,0018599009	0,001688364	0,001183896	0,0012785538	0,00049896

### Essais d'endommagements sur le tissu de fibres de carbone

	Rinitiale	Ravec1endom	Ravec2endom
mesure1	22.10	45.29	74.19
mesure2	22.03	44.23	72.83
mesure3	21.96	43.72	75.59
mesure4	21.94	44.14	74.78
mesure5	22.19	44.04	73.75
Moyenne	22.04	44.28	74.23



6.3. Fiche technique de la fibre de carbone utilisée pour les expériences



# TORAYCA® T700S DATA SHEET

Highest strength, standard modulus fiber available with excellent processing characteristics for filament winding and prepreg. This never twisted fiber is used in high tensile applications like pressure vessels, recreational, and industrial.

## FIBER PROPERTIES

		English	Metric	Test Method
Tensile Strength		711 ksi	4,900 MPa	TY-030B-01
Tensile Modulus		33.4 Msi	230 GPa	TY-030B-01
Strain		2.1 %	2.1 %	TY-030B-01
Density		0.065 lbs/in <sup>3</sup>	1.80 g/cm <sup>3</sup>	TY-030B-02
Filament Diameter		2.8E-04 in.	7 µm	
Yield	6K	3,724 ft/lbs	400 g/1000m	TY-030B-03
	12K	1,862 ft/lbs	800 g/1000m	TY-030B-03
	24K	903 ft/lbs	1,650 g/1000m	TY-030B-03
Sizing Type & Amount	50C		1.0 %	TY-030B-05
	60E		0.3 %	TY-030B-05
	FOE		0.7 %	TY-030B-05
		Twist	Never twisted	

## FUNCTIONAL PROPERTIES

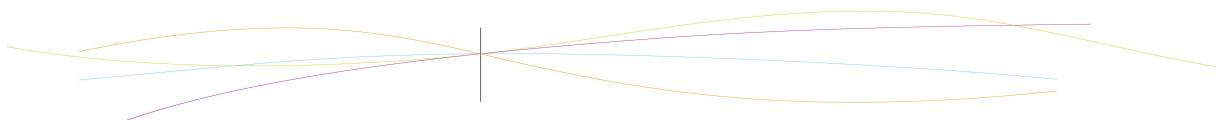
CTE	-0.38 $\alpha \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
Specific Heat	0.18 Cal/g·°C
Thermal Conductivity	0.0224 Cal/cm·s·°C
Electric Resistivity	1.6 x 10 <sup>10</sup> Ω·cm
Chemical Composition: Carbon	93 %
Na + K	<50 ppm

## COMPOSITE PROPERTIES \*

Tensile Strength	370 ksi	2,550 MPa	ASTM D-3039
Tensile Modulus	20.0 Msi	135 GPa	ASTM D-3039
Tensile Strain	1.7 %	1.7 %	ASTM D-3039
Compressive Strength	215 ksi	1,470 MPa	ASTM D-695
Flexural Strength	245 ksi	1,670 MPa	ASTM D-790
Flexural Modulus	17.5 Msi	120 GPa	ASTM D-790
ILSS	13 ksi	9 kgf/mm <sup>2</sup>	ASTM D-2344
90° Tensile Strength	10.0 ksi	69 MPa	ASTM D-3039

\* Toray 250°F Epoxy Resin. Normalized to 60% fiber volume.

**TORAY CARBON FIBERS AMERICA, INC.**



6.4. Fiche technique de l'éprouvette utilisée lors de l'essai de traction



**THERMOPLASTIC COMPOSITES**  
**Technical Data Sheet**

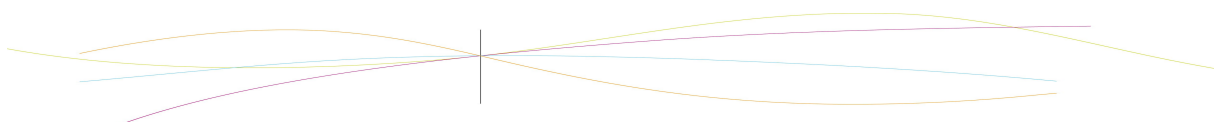
**3106-P23**  
**Carbon/PPS Pi preg®**

	Materials	Properties	Units	Results	
<b>MATERIAL</b>	<b>Fabric</b>	Style		3106	
		Fiber (Warp/Weft)		3K HS Carbon	
		Fiber density	g/cm <sup>3</sup>	1.77	
		Weave		5 H Satin	
Areal weight		g/m <sup>2</sup>	280		
<b>Polymer</b>	<b>Pi preg®</b>	Construction (Warp/Weft)	yarn/cm	7.0 x 7.0	
		Thermoplastic Structure		PPS semi-crystalline	
		Density	g/cm <sup>3</sup>	1.35	
Areal weight		g/m <sup>2</sup>	214		
<b>Laminate</b>		<b>Laminate</b>	Areal weight	g/m <sup>2</sup>	494
	Polymer content in volume		%	50	
	Polymer content in weight		%	43	
Orientation			orthogonal		
Density	g/cm <sup>3</sup>		1.56		
Thickness	mm/ply	0.317			
<b>THERMAL PROPERTIES</b>	<i>Properties</i>	<i>Standards</i>	<i>Units</i>	<i>Results</i>	
	Melting temperature Tm	DSC	°C	280	
	Glass transition temperature Tg	DSC	°C	90	
	Processing temperature Tp		°C	310 ± 15	
	Processing pressure		bar	10	
<b>MECHANICAL PROPERTIES</b>	<i>Properties</i>	<i>Standards</i>	<i>Units</i>	<i>Results</i>	
	<b>Tensile</b>	ISO 527-4	Strength	MPa	790
			Modulus	GPa	59.7
			Elongation at break	%	1.27
	<b>Flexural</b>	ISO 14125	Strength	MPa	870
			Modulus	GPa	53.2
	<b>In Plane Shear (tenale at ±45°)</b>	ISO 14129	Strength	MPa	120
	<b>Inter Laminar Shear</b>	ISO 14130	Strength	MPa	66.9
	<b>Compressive</b>	ISO 14126	Strength	MPa	710
			Modulus	GPa	-

The information contained in this document is based on the present state of our knowledge. Values quoted are average values and are given for guidance purposes only. Any conclusions and recommendations are made without liability on our part. Buyers and users should make their own assessment of our products under their own conditions and requirements.

This document belongs exclusively to Porcher Industries. The reproduction is strictly forbidden.

3106-P23-PLCCPS-02





## 6.5. Norme ASTM D3039



Designation: D 3039/D 3039M – 00<sup>\*1</sup>

### Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials<sup>1</sup>

This standard is issued under the fixed designation D 3039/D 3039M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon ( $\epsilon$ ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

*This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.*

<sup>\*1</sup> Norm—Eq 5 was revised editorially in December 2002.

#### 1. Scope

1.1 This test method determines the in-plane tensile properties of polymer matrix composite materials reinforced by high-modulus fibers. The composite material forms are limited to continuous fiber or discontinuous fiber-reinforced composites in which the laminate is balanced and symmetric with respect to the test direction.

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. Within the text, the inch-pound units are shown in brackets. The values stated in each system are not exact equivalents; therefore, each system must be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

#### 2. Referenced Documents

##### 2.1 ASTM Standards:

- D 792 Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement<sup>2</sup>
- D 883 Terminology Relating to Plastics<sup>2</sup>
- D 2584 Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins<sup>3</sup>
- D 2734 Test Method for Void Content of Reinforced Plastics<sup>3</sup>
- D 3171 Test Methods for Constituent Content of Composites Materials<sup>4</sup>
- D 3878 Terminology for Composite Materials<sup>4</sup>
- D 5229/D 5229M Test Method for Moisture Absorption

Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials<sup>4</sup>

- E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines<sup>5</sup>
- E 6 Terminology Relating to Methods of Mechanical Testing<sup>5</sup>
- E 83 Practice for Verification and Classification of Extensometers<sup>5</sup>
- E 111 Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus<sup>5</sup>
- E 122 Practice for Choice of Sample Size to Estimate a Measure of Quality for a Lot or Process<sup>6</sup>
- E 132 Test Method for Poisson's Ratio at Room Temperature<sup>5</sup>
- E 177 Practice for Use of the Terms Precision and Bias in ASTM Test Methods<sup>6</sup>
- E 251 Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages<sup>5</sup>
- E 456 Terminology Relating to Quality and Statistics<sup>6</sup>
- E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method<sup>6</sup>
- E 1012 Practice for Verification of Specimen Alignment Under Tensile Loading<sup>5</sup>
- E 1237 Guide for Installing Bonded Resistance Strain Gages<sup>5</sup>

#### 3. Terminology

3.1 *Definitions*—Terminology D 3878 defines terms relating to high-modulus fibers and their composites. Terminology D 883 defines terms relating to plastics. Terminology E 6 defines terms relating to mechanical testing. Terminology E 456 and Practice E 177 define terms relating to statistics. In the event of a conflict between terms, Terminology D 3878 shall have precedence over the other standards.

##### 3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

NOTE—If the term represents a physical quantity, its analytical dimensions are stated immediately following the term (or letter symbol) in fundamental dimension form, using the following ASTM standard symbology for fundamental

<sup>1</sup> This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee D30 on Composite Materials and is the direct responsibility of Subcommittee D30.04 on Lamina and Laminate Test Methods.

Current edition approved April 10, 2000. Published July 2000. Originally published as D 3039 – 71T. Last previous edition D 3039 – 95a.

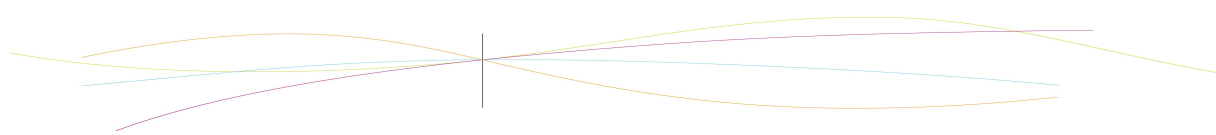
<sup>2</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.01.

<sup>3</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 08.02.

<sup>4</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03.

<sup>5</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

<sup>6</sup> Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02.



 D 3039/D 3039M – 00\*1

dimensions, shown within square brackets:  $[M]$  for mass,  $[L]$  for length,  $[T]$  for time,  $[\Theta]$  for thermodynamic temperature, and  $[nd]$  for nondimensional quantities. Use of these symbols is restricted to analytical dimensions when used with square brackets, as the symbols may have other definitions when used without the brackets.

3.2.1 *nominal value*,  $n$ —a value, existing in name only, assigned to a measurable property for the purpose of convenient designation. Tolerances may be applied to a nominal value to define an acceptable range for the property.

3.2.2 *transition region*,  $n$ —a strain region of a stress-strain or strain-strain curve over which a significant change in the slope of the curve occurs within a small strain range.

3.2.3 *transition strain*,  $e^{\text{transition}} [nd]$ ,  $n$ —the strain value at the mid range of the transition region between the two essentially linear portions of a bilinear stress-strain or strain-strain curve.

3.2.3.1 *Discussion*—Many filamentary composite materials show essentially bilinear behavior during loading, such as seen in plots of either longitudinal stress versus longitudinal strain or transverse strain versus long longitudinal strain. There are varying physical reasons for the existence of a transition region. Common examples include: matrix cracking under tensile loading and ply delamination.

3.3 *Symbols:*

3.3.1  $A$ —minimum cross-sectional area of a coupon.

3.3.2  $B_y$ —percent bending for a uniaxial coupon of rectangular cross section about  $y$  axis of the specimen (about the narrow direction).

3.3.3  $B_z$ —percent bending for a uniaxial coupon of rectangular cross section about  $z$  axis of the specimen (about the wide direction).

3.3.4  $CV$ —coefficient of variation statistic of a sample population for a given property (in percent).

3.3.5  $E$ —modulus of elasticity in the test direction.

3.3.6  $F^m$ —ultimate tensile strength in the test direction.

3.3.7  $F^s$ —ultimate shear strength in the test direction.

3.3.8  $h$ —coupon thickness.

3.3.9  $L$ —extensometer gage length.

3.3.10  $L_{\text{min}}$ —minimum required bonded tab length.

3.3.11  $n$ —number of coupons per sample population.

3.3.12  $P$ —load carried by test coupon.

3.3.13  $P^f$ —load carried by test coupon at failure.

3.3.14  $P^{\text{max}}$ —maximum load carried by test coupon before failure.

3.3.15  $s_{n-1}$ —standard deviation statistic of a sample population for a given property.

3.3.16  $w$ —coupon width.

3.3.17  $x_i$ —test result for an individual coupon from the sample population for a given property.

3.3.18  $\bar{x}$ —mean or average (estimate of mean) of a sample population for a given property.

3.3.19  $\delta$ —extensional displacement.

3.3.20  $\epsilon$ —general symbol for strain, whether normal strain or shear strain.

3.3.21  $\epsilon$ —indicated normal strain from strain transducer or extensometer.

3.3.22  $\sigma$ —normal stress.

3.3.23  $\nu$ —Poisson's ratio.

#### 4. Summary of Test Method

4.1 A thin flat strip of material having a constant rectangular cross section is mounted in the grips of a mechanical testing machine and monotonically loaded in tension while recording load. The ultimate strength of the material can be determined from the maximum load carried before failure. If the coupon strain is monitored with strain or displacement transducers then the stress-strain response of the material can be determined, from which the ultimate tensile strain, tensile modulus of elasticity, Poisson's ratio, and transition strain can be derived.

#### 5. Significance and Use

5.1 This test method is designed to produce tensile property data for material specifications, research and development, quality assurance, and structural design and analysis. Factors that influence the tensile response and should therefore be reported include the following: material, methods of material preparation and lay-up, specimen stacking sequence, specimen preparation, specimen conditioning, environment of testing, specimen alignment and gripping, speed of testing, time at temperature, void content, and volume percent reinforcement. Properties, in the test direction, which may be obtained from this test method include the following:

5.1.1 Ultimate tensile strength,

5.1.2 Ultimate tensile strain,

5.1.3 Tensile chord modulus of elasticity,

5.1.4 Poisson's ratio, and

5.1.5 Transition strain.

#### 6. Interferences

6.1 *Material and Specimen Preparation*—Poor material fabrication practices, lack of control of fiber alignment, and damage induced by improper coupon machining are known causes of high material data scatter in composites.

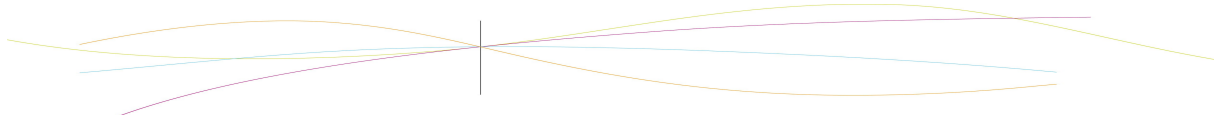
6.2 *Gripping*—A high percentage of grip-induced failures, especially when combined with high material data scatter, is an indicator of specimen gripping problems. Specimen gripping methods are discussed further in 7.2.4, 8.2, and 11.5.

6.3 *System Alignment*—Excessive bending will cause premature failure, as well as highly inaccurate modulus of elasticity determination. Every effort should be made to eliminate excess bending from the test system. Bending may occur as a result of misaligned grips or from specimens themselves if improperly installed in the grips or out-of-tolerance caused by poor specimen preparation. If there is any doubt as to the alignment inherent in a given test machine, then the alignment should be checked as discussed in 7.2.5.


6.4 *Edge Effects in Angle Ply Laminates*—Premature failure and lower stiffnesses are observed as a result of edge softening in laminates containing off-axis plies. Because of this, the strength and modulus for angle ply laminates can be drastically underestimated. For quasi-isotropic laminates containing significant  $0^\circ$  plies, the effect is not as significant.

#### 7. Apparatus

7.1 *Micrometers*—A micrometer with a 4- to 5-mm [0.16- to 0.20-in] nominal diameter double-ball interface shall be





 D 3039/D 3039M – 00<sup>1</sup>

used to measure the thickness of the specimen. A micrometer with a flat anvil interface shall be used to measure the width of the specimen. The accuracy of the instruments shall be suitable for reading to within 1% of the sample width and thickness. For typical specimen geometries, an instrument with an accuracy of  $\pm 2.5 \mu\text{m}$  [ $\pm 0.0001 \text{ in.}$ ] is adequate for thickness measurement, while an instrument with an accuracy of  $\pm 25 \mu\text{m}$  [ $\pm 0.001 \text{ in.}$ ] is adequate for width measurement.

**7.2 Testing Machine**—The testing machine shall be in conformance with Practices E 4 and shall satisfy the following requirements:

**7.2.1 Testing Machine Heads**—The testing machine shall have both an essentially stationary head and a movable head.

**7.2.2 Drive Mechanism**—The testing machine drive mechanism shall be capable of imparting to the movable head a controlled velocity with respect to the stationary head. The velocity of the movable head shall be capable of being regulated as specified in 11.3.

**7.2.3 Load Indicator**—The testing machine load-sensing device shall be capable of indicating the total load being carried by the test specimen. This device shall be essentially free from inertia lag at the specified rate of testing and shall indicate the load with an accuracy over the load range(s) of interest of within  $\pm 1\%$  of the indicated value. The load range(s) of interest may be fairly low for modulus evaluation, much higher for strength evaluation, or both, as required.

**NOTE 1**—Obtaining precision load data over a large range of interest in the same test, such as when both elastic modulus and ultimate load are being determined, place extreme requirements on the load cell and its calibration. For some equipment, a special calibration may be required. For some combinations of material and load cell, simultaneous precision measurement of both elastic modulus and ultimate strength may not be possible and measurement of modulus and strength may have to be performed in separate tests using a different load cell range for each test.

**7.2.4 Grips**—Each head of the testing machine shall carry one grip for holding the test specimen so that the direction of load applied to the specimen is coincident with the longitudinal axis of the specimen. The grips shall apply sufficient lateral pressure to prevent slippage between the grip face and the coupon. If tabs are used the grips should be long enough that they overhang the beveled portion of the tab by approximately 10 to 15 mm [0.5 in.]. It is highly desirable to use grips that are rotationally self-aligning to minimize bending stresses in the coupon.

**NOTE 2**—Grip surfaces that are lightly serrated, approximately 1 serration/mm [25 serrations/in.], have been found satisfactory for use in wedge-action grips when kept clean and sharp; coarse serrations may produce grip-induced failures in untabbed coupons. Smooth gripping surfaces have been used successfully with either hydraulic grips or an emery cloth interface, or both.

**7.2.5 System Alignment**—Poor system alignment can be a major contributor to premature failure, to elastic property data scatter, or both. Practice E 1012 describes bending evaluation guidelines and describes potential sources of misalignment during tensile testing. In addition to Practice E 1012, the degree of bending in a tensile system can also be evaluated using the following related procedure. Specimen bending is considered separately in 11.6.1.

**7.2.5.1** A rectangular alignment coupon, preferably similar in size and stiffness to the test specimen of interest, is instrumented with a minimum of three longitudinal strain gages of similar type, two on the front face across the width and one on the back face of the specimen, as shown in Fig. 1. Any difference in indicated strain between these gages during loading provides a measure of the amount of bending in the thickness plane ( $B_x$ ) and width plane ( $B_y$ ) of the coupon. The strain gage location should normally be located in the middle of the coupon gage section (if modulus determination is a concern), near a grip (if premature grip failures are a problem), or any combination of these areas.

**7.2.5.2** When evaluating system alignment, it is advisable to perform the alignment check with the same coupon inserted in each of the four possible installation permutations (described relative to the initial position): initial (top-front facing observer), rotated back to front only (top back facing observer), rotated end for end only (bottom front facing observer), and rotated both front to back and end to end (bottom back facing observer). These four data sets provide an indication of whether the bending is due to the system itself or to tolerance in the alignment check coupon or gaging.

**7.2.5.3** The zero strain point may be taken either before gripping or after gripping. The strain response of the alignment coupon is subsequently monitored during the gripping process, the tensile loading process, or both. Eq 1-3 use these indicated strains to calculate the ratio of the percentage of bending strain to average extensional strain for each bending plane of the alignment coupon and the total percent bending,  $B_{total}$ . Plotting percent bending versus axial average strain is useful in understanding trends in the bending behavior of the system.

**7.2.5.4** Problems with failures during gripping would be reason to examine bending strains during the gripping process in the location near the grip. Concern over modulus data scatter would be reason to evaluate bending strains over the modulus evaluation load range for the typical transducer location. Excessive failures near the grips would be reason to evaluate bending strains near the grip at high loading levels. While the

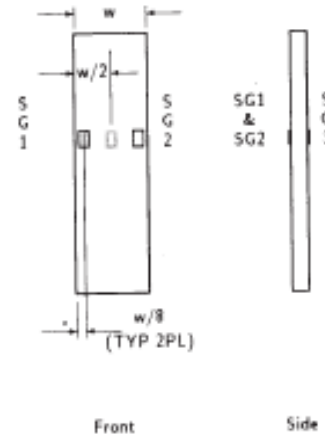
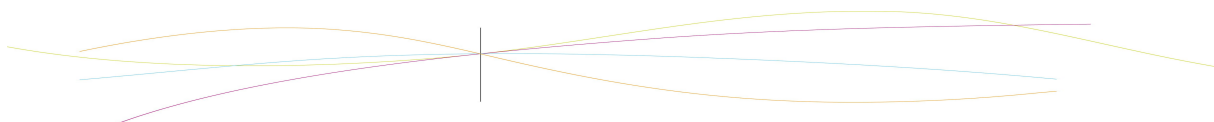



FIG. 1 Gage Locations for System Alignment Check Coupon



 D 3039/D 3039M – 00\*1

maximum advisable amount of system misalignment is material and location dependent, good testing practice is generally able to limit percent bending to a range of 3 to 5 % at moderate strain levels (>1000  $\mu\epsilon$ ). A system showing excessive bending for the given application should be readjusted or modified.

$$B_y = \frac{\epsilon_{ms} - \epsilon_1}{\epsilon_{ms}} \times 100 \quad (1)$$

$$B_z = \frac{4/3 (\epsilon_2 - \epsilon_3)}{\epsilon_{ms}} \times 100 \quad (2)$$

where:

$B_y$  = percent bending about system y axis (about the narrow plane), as calculated by Eq 1, %;

$B_z$  = percent bending about system z axis (about the wide plane), as calculated by Eq 2, %;

$\epsilon_1, \epsilon_2, \text{ and } \epsilon_3$  = indicated longitudinal strains displayed by Gages 1, 2, and 3, respectively, of Fig. 1,  $\mu\epsilon$ ; and

$\epsilon_{ms}$  =  $(\epsilon_1 + \epsilon_2)/2 + \epsilon_3/2$ .

The total bending component is:

$$B_{total} = |B_y| + |B_z| \quad (3)$$

**7.3 Strain-Indicating Device**—Load-strain data, if required, shall be determined by means of either a strain transducer or an extensometer. Attachment of the strain-indicating device to the coupon shall not cause damage to the specimen surface. If Poisson's ratio is to be determined, the specimen shall be instrumented to measure strain in both longitudinal and lateral directions. If the modulus of elasticity is to be determined, the longitudinal strain should be simultaneously measured on opposite faces of the specimen to allow for a correction as a result of any bending of the specimen (see 11.6 for further guidance).

**7.3.1 Bonded Resistance Strain Gage Selection**—Strain gage selection is a compromise based on the type of material. An active gage length of 6 mm [0.25 in.] is recommended for most materials. Active gage lengths should not be less than 3 mm [0.125 in.]<sup>7</sup> Gage calibration certification shall comply with Test Methods E 251. When testing woven fabric laminates, gage selection should consider the use of an active gage length that is at least as great as the characteristic repeating unit of the weave. Some guidelines on the use of strain gages on composites follow. A general reference on the subject is Tuttle and Brinson.<sup>8</sup>

**7.3.1.1 Surface preparation of fiber-reinforced composites** in accordance with Practice E 1237 can penetrate the matrix material and cause damage to the reinforcing fibers resulting in improper coupon failures. Reinforcing fibers should not be exposed or damaged during the surface preparation process.

The strain gage manufacturer should be consulted regarding surface preparation guidelines and recommended bonding agents for composites pending the development of a set of standard practices for strain gage installation surface preparation of fiber-reinforced composite materials.

**7.3.1.2** Consideration should be given to the selection of gages having larger resistances to reduce heating effects on low-conductivity materials. Resistances of 350  $\Omega$  or higher are preferred. Additional consideration should be given to the use of the minimum possible gage excitation voltage consistent with the desired accuracy (1 to 2 V is recommended) to reduce further the power consumed by the gage. Heating of the coupon by the gage may affect the performance of the material directly, or it may affect the indicated strain as a result of a difference between the gage temperature compensation factor and the coefficient of thermal expansion of the coupon material.

**7.3.1.3** Consideration of some form of temperature compensation is recommended, even when testing at standard laboratory atmosphere. Temperature compensation is required when testing in nonambient temperature environments.

**7.3.1.4** Consideration should be given to the transverse sensitivity of the selected strain gage. The strain gage manufacturer should be consulted for recommendations on transverse sensitivity corrections and effects on composites. This is particularly important for a transversely mounted gage used to determine Poisson's ratio, as discussed in Note 11.

**7.3.2 Extensometers**—For most purposes, the extensometer gage length should be in the range of 10 to 50 mm [0.5 to 2.0 in.]. Extensometers shall satisfy, at a minimum, Practice E 83, Class B-1 requirements for the strain range of interest and shall be calibrated over that strain range in accordance with Practice E 83. For extremely stiff materials, or for measurement of transverse strains, the fixed error allowed by Class B-1 extensometers may be significant, in which case Class A extensometers should be considered. The extensometer shall be essentially free of inertia lag at the specified speed of testing, and the weight of the extensometer should not induce bending strains greater than those allowed in 6.3.

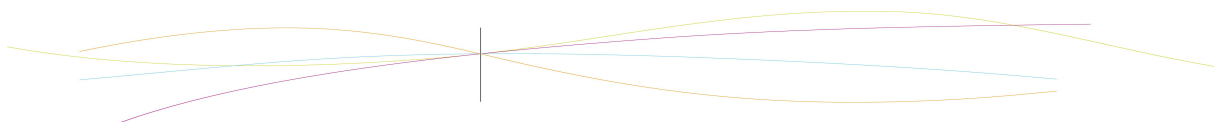
**Note 3**—It is generally less difficult to perform strain calibration on extensometers of longer gage length as less precision in displacement is required of the extensometer calibration device.

**7.4 Conditioning Chamber**—When conditioning materials at nonlaboratory environments, a temperature/vaporlevel-controlled environmental conditioning chamber is required that shall be capable of maintaining the required temperature to within  $\pm 3^\circ\text{C}$  [ $\pm 5^\circ\text{F}$ ] and the required relative vapor level to within  $\pm 3\%$ . Chamber conditions shall be monitored either on an automated continuous basis or on a manual basis at regular intervals.

**7.5 Environmental Test Chamber**—An environmental test chamber is required for test environments other than ambient testing laboratory conditions. This chamber shall be capable of maintaining the gage section of the test specimen at the required test environment during the mechanical test.

<sup>7</sup> A typical gage would have a 0.25-in. active gage length, 350- $\Omega$  resistance, a strain rating of 3% or better, and the appropriate environmental resistance and thermal coefficient.

<sup>8</sup> Tuttle, M. E. and Brinson, H. F., "Resistance-Foil Strain-Gage Technology as Applied to Composite Materials," *Experimental Mechanics*, Vol. 24, No. 1, March 1984, pp. 54-65; errata noted in Vol. 26, No. 2, June 1986, pp. 153-154.





**8. Sampling and Test Specimens**

8.1 *Sampling*—Test at least five specimens per test condition unless valid results can be gained through the use of fewer specimens, such as in the case of a designed experiment. For statistically significant data, the procedures outlined in Practice E 122 should be consulted. Report the method of sampling.

NOTE 4—If specimens are to undergo environmental conditioning to equilibrium, and are of such type or geometry that the weight change of the material cannot be properly measured by weighing the specimen itself (such as a tabbed mechanical coupon), then use another traveler coupon of the same nominal thickness and appropriate size (but without tabs) to determine when equilibrium has been reached for the specimens being conditioned.

8.2 *Geometry*—Design of mechanical test coupons, especially those using end tabs, remains to a large extent an art rather than a science, with no industry consensus on how to approach the engineering of the gripping interface. Each major composite testing laboratory has developed gripping methods for the specific material systems and environments commonly encountered within that laboratory. Comparison of these methods shows them to differ widely, making it extremely difficult to recommend a universally useful approach or set of approaches. Because of this difficulty, definition of the geometry of the test coupon is broken down into the following three levels, which are discussed further in each appropriate section:

Purpose	Degree of Geometry Definition
8.2.1 General Requirements	Mandatory Shape and Tolerances
8.2.2 Specific Recommendations	Nonmandatory Suggested Dimensions
8.2.3 Detailed Examples	Nonmandatory Typical Practices

8.2.1 *General Requirements*:  
 8.2.1.1 *Shape, Dimensions, and Tolerances*—The complete list of requirements for specimen shape, dimensions, and tolerances is shown in Table 1.

8.2.1.2 *Use of Tabs*—Tabs are not required. The key factor in the selection of specimen tolerances and gripping methods is the successful introduction of load into the specimen and the prevention of premature failure as a result of a significant discontinuity. Therefore, determine the need to use tabs, and specification of the major tab design parameters, by the end

result: acceptable failure mode and location. If acceptable failure modes occur with reasonable frequency, then there is no reason to change a given gripping method (see 11.10).

8.2.2 *Specific Recommendations*:  
 8.2.2.1 *Width, Thickness, and Length*—Select the specimen width and thickness to promote failure in the gage section and assure that the specimen contains a sufficient number of fibers in the cross section to be statistically representative of the bulk material. The specimen length should normally be substantially longer than the minimum requirement to minimize bending stresses caused by minor grip eccentricities. Keep the gage section as far from the grips as reasonably possible and provide a significant amount of material under stress and therefore produce a more statistically significant result. The minimum requirements for specimen design shown in Table 1 are by themselves insufficient to create a properly dimensioned and toleranced coupon drawing. Therefore, recommendations on other important dimensions are provided for typical material configurations in Table 2. These geometries have been found by a number of testing laboratories to produce acceptable failure modes on a wide variety of material systems, but use of them does not guarantee success for every existing or future material system.

8.2.2.2 *Gripping/Use of Tabs*—There are many material configurations, such as multidirectional laminates, fabric-based materials, or randomly reinforced sheet-molding compounds, which can be successfully tested without tabs. However, tabs are strongly recommended when testing unidirectional materials (or strongly unidirectionally dominated laminates) to failure in the fiber direction. Tabs may also be required when testing unidirectional materials in the matrix direction to prevent gripping damage.

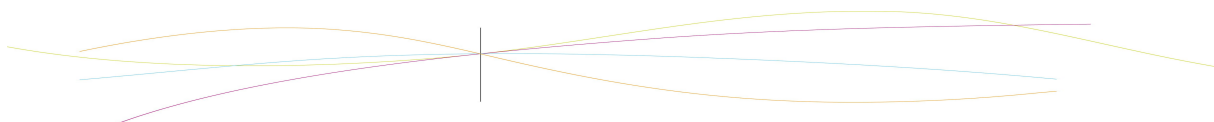
8.2.2.3 *Tab Geometry*—Recommendations on important dimensions are provided for typical material configurations in Table 2. These dimensions have been found by a number of testing laboratories to produce acceptable failure modes on a wide variety of material systems, but use of them does not guarantee success for every existing or future material system. The selection of a tab configuration that can successfully produce a gage section tensile failure is dependent upon the coupon material, coupon ply orientation, and the type of grips being used. When pressure-operated nonwedge grips are used with care, squared-off 90° tabs have been used successfully. Wedge-operated grips have been used most successfully with tabs having low bevel angles (7 to 10°) and a feathered smooth transition into the coupon. For alignment purposes, it is essential that the tabs be of matched thickness.

8.2.2.4 *Friction Tabs*—Tabs need not always be bonded to the material under test to be effective in introducing the load into the specimen. Friction tabs, essentially nonbonded tabs held in place by the pressure of the grip, and often used with emery cloth or some other light abrasive between the tab and the coupon, have been successfully used in some applications. In specific cases, lightly serrated wedge grips (see Note 2) have been successfully used with only emery cloth as the interface between the grip and the coupon. However, the abrasive used

**TABLE 1 Tensile Specimen Geometry Requirements**

Parameter	Requirement
<b>Coupon Requirements:</b>	
shape	constant rectangular cross-section
minimum length	gripping + 2 times width + gage length
specimen width	as needed <sup>4</sup>
specimen width tolerance	± 1 % of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	± 4 % of thickness
specimen flatness	flat with light finger pressure
<b>Tab Requirements (if used):</b>	
tab material	as needed
fiber orientation (composite tabs)	as needed
tab thickness	as needed
tab thickness variation between	± 1 % tab thickness
<b>tabs</b>	
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

<sup>4</sup> See 8.2.2 or Table 2 for recommendations.



**D 3039/D 3039M – 00<sup>1</sup>**

**TABLE 2 Tensile Specimen Geometry Recommendations<sup>4</sup>**

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, <sup>a</sup>
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [ 7.0]	2.0 [0.085]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

<sup>4</sup> Dimensions in this table and the tolerances of Fig. 2 or Fig. 3 are recommendations only and may be varied so long as the requirements of Table 1 are met.

must be able to withstand significant compressive loads. Some types of emery cloth have been found ineffective in this application because of disintegration of the abrasive.<sup>9</sup>

**8.2.2.5 Tab Material**—The most consistently used bonded tab material has been continuous E-glass fiber-reinforced polymer matrix materials (woven or unwoven) in a [0/90]ns laminate configuration. The tab material is commonly applied at 45° to the loading direction to provide a soft interface. Other configurations that have reportedly been successfully used have incorporated steel tabs or tabs made of the same material as is being tested.

**8.2.2.6 Bonded Tab Length**—When using bonded tabs, estimate the minimum suggested tab length for bonded tabs by the following simple equation. As this equation does not account for the peaking stresses that are known to exist at the ends of bonded joints. The tab length calculated by this equation should normally be increased by some factor to reduce the chances of joint failure:

$$L_{min} = F^{2u}h/2t^{2u} \tag{4}$$

where:

- $L_{min}$  = minimum required bonded tab length, mm [in.];
- $F^{2u}$  = ultimate tensile strength of coupon material, MPa [psi];
- $h$  = coupon thickness, mm [in.]; and
- $t^{2u}$  = ultimate shear strength of adhesive, coupon material, or tab material (whichever is lowest), MPa [psi].

**8.2.2.7 Bonded Tab Adhesive**—Any high-elongation (tough) adhesive system that meets the environmental requirements may be used when bonding tabs to the material under test. A uniform bondline of minimum thickness is desirable to reduce undesirable stresses in the assembly.

**8.2.3 Detailed Examples**—The minimum requirements for specimen design discussed in 8.2.1 are by themselves insufficient to create a properly dimensioned and toleranced coupon drawing. Dimensionally toleranced specimen drawings for both tabbed and untabbed forms are shown as examples in Fig. 2 (SI) and Fig. 3 (inch-pound). The tolerances on these drawings are fixed, but satisfy the requirements of Table 1 for all of the recommended configurations of Table 2. For a specific configuration, the tolerances on Fig. 2 and Fig. 3 might be able to be relaxed.

**8.3 Specimen Preparation:**

**8.3.1 Panel Fabrication**—Control of fiber alignment is critical. Improper fiber alignment will reduce the measured

properties. Erratic fiber alignment will also increase the coefficient of variation. The specimen preparation method shall be reported.

**8.3.2 Machining Methods**—Specimen preparation is extremely important for this specimen. Mold the specimens individually to avoid edge and cutting effects or cut from them plates. If they are cut from plates, take precautions to avoid notches, undercuts, rough or uneven surfaces, or delaminations caused by inappropriate machining methods. Obtain final dimensions by water-lubricated precision sawing, milling, or grinding. The use of diamond tooling has been found to be extremely effective for many material systems. Edges should be flat and parallel within the specified tolerances.

**8.3.3 Labeling**—Label the coupons so that they will be distinct from each other and traceable back to the raw material and in a manner that will both be unaffected by the test and not influence the test.

**9. Calibration**

9.1 The accuracy of all measuring equipment shall have certified calibrations that are current at the time of use of the equipment.

**10. Conditioning**

10.1 *Standard Conditioning Procedure*—Unless a different environment is specified as part of the experiment, condition the test specimens in accordance with Procedure C of Test Method D 5229/D 5229M and store and test at standard laboratory atmosphere (23 ± 3°C [73 ± 5°F] and 50 ± 10 % relative humidity).

**11. Procedure**

**11.1 Parameters To Be Specified Before Test:**

- 11.1.1 The tension specimen sampling method, coupon type and geometry, and conditioning travelers (if required).
- 11.1.2 The tensile properties and data reporting format desired.

*NOTE 5*—Determine specific material property, accuracy, and data reporting requirements before test for proper selection of instrumentation and data-recording equipment. Estimate operating stress and strain levels to aid in transducer selection, calibration of equipment, and determination of equipment settings.

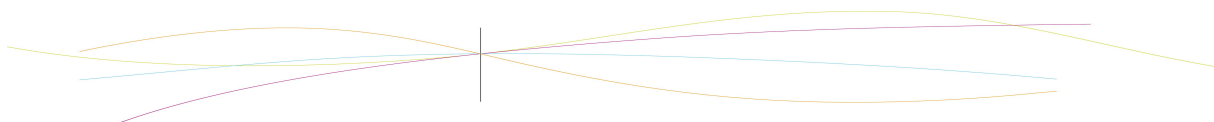
11.1.3 The environmental conditioning test parameters.

11.1.4 If performed, the sampling method, coupon geometry, and test parameters used to determine density and reinforcement volume.

11.2 *General Instructions:*

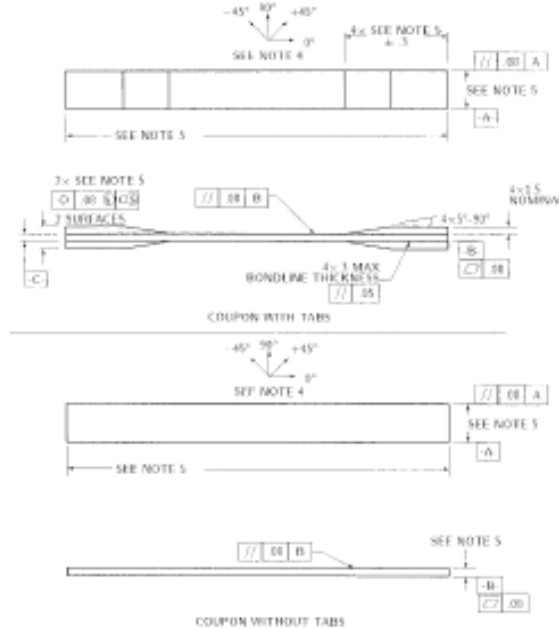
11.2.1 Report any deviations from this test method, whether intentional or inadvertent.

<sup>9</sup> E-Z Flex Metalite K224 cloth, Grit 120-J, available from Norton Company, Troy, NY 12181, has been found satisfactory in this application. Other equivalent types of emery cloth should also be suitable.



**D 3039/D 3039M – 00<sup>01</sup>**

- DRAWING NOTES**
1. INTERPRET DRAWING IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5M-1987, SUBJECT TO THE FOLLOWING:
  2. ALL DIMENSIONS (UNLESS SPECIFIED) ARE IN METRES WITH DECIMAL TOLERANCES AS FOLLOWS:  
NO DECIMAL: ±.3 | .X: ±.3 | .XX: ±.3
  3. ALL ANGLES HAVE TOLERANCE OF ±.5°.
  4. FLY ORIENTATION DIRECTION TOLERANCE RELATIVE TO [A] WITHIN ±.5°.
  5. FINISH ON MACHINED EDGES NOT TO EXCEED 1.6 $\sqrt{R}$  (SYNERGELY IN ACCORDANCE WITH ASA B46.1, WITH ROUGHNESS HEIGHT IN MICROMETRES).
  6. VALUES TO BE PROVIDED FOR THE FOLLOWING, SUBJECT TO ANY RANGES SHOWN ON THE FIELD OF DRAWING MATERIAL: LIP-UP, PLY ORIENTATION REFERENCE RELATIVE TO [X], OVERALL LENGTH, GAGE LENGTH, COUPON THICKNESS, TAB MATERIAL, TAB THICKNESS, TAB LENGTH, TAB BEVEL, ANGLE, TAB ADHESIVE.
  7. NO ADHESIVE BUILDUP ALLOWED IN THE AREA.



**FIG. 2 Tension Test Specimen Drawing (8)**

11.2.2 If specific gravity, density, reinforcement volume, or void volume are to be reported, then obtain these samples from the same panels being tension tested. Specific gravity and density may be evaluated by means of Test Methods D 792. Volume percent of the constituents may be evaluated by one of the matrix digestion procedures of Test Method D 3171, or, for certain reinforcement materials such as glass and ceramics, by the matrix burn-off technique of Test Method D 2584. The void content equations of Test Methods D 2734 are applicable to both Test Method D 2584 and the matrix digestion procedures.

11.2.3 Following final specimen machining and any conditioning, but before the tension testing, determine the specimen area as  $A = w \times h$ , at three places in the gage section, and report the area as the average of these three determinations to the accuracy in 7.1. Record the average area in units of mm<sup>2</sup> (in.<sup>2</sup>).

11.3 *Speed of Testing*—Set the speed of testing to effect a nearly constant strain rate in the gage section. If strain control is not available on the testing machine, this may be approximated by repeated monitoring and adjusting of the rate of load application to maintain a nearly constant strain rate, as mea-

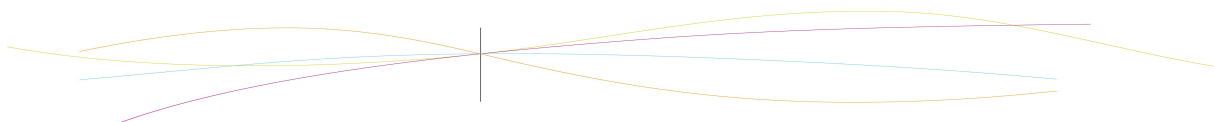
sured by strain transducer response versus time. The strain rate should be selected so as to produce failure within 1 to 10 min. If the ultimate strain of the material cannot be reasonably estimated, initial trials should be conducted using standard speeds until the ultimate strain of the material and the compliance of the system are known, and the strain rate can be adjusted. The suggested standard speeds are:

11.3.1 *Strain-Controlled Tests*—A standard strain rate of 0.01 min<sup>-1</sup>.

11.3.2 *Constant Head-Speed Tests*—A standard head displacement rate of 2 mm/min [0.05 in./min].

**NOTE 6**—Use of a fixed head speed in testing machine systems with a high compliance may result in a strain rate that is much lower than required. Use of wedge grips can cause extreme compliance in the system, especially when using compliant tab materials. In some such cases, actual strain rates 10 to 50 times lower than estimated by head speeds have been observed.

11.4 *Test Environment*—Condition the specimen to the desired moisture profile and, if possible, test under the same conditioning fluid exposure level. However, cases such as



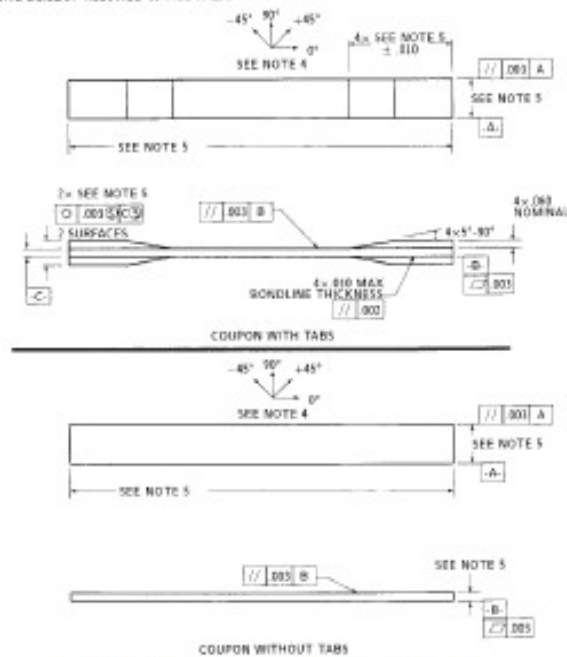


**D 3039/D 3039M – 00<sup>1</sup>**

**DRAWING NOTES:**

1. INTERPRET DRAWING IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5M-1982, SUBJECT TO THE FOLLOWING:
2. ALL DIMENSIONS IN INCHES WITH DECIMAL TOLERANCES AS FOLLOWS:  

.X	.XX	.XXX
±.1	±.03	±.02
3. ALL ANGLES HAVE TOLERANCE OF ± 5°.
4. PLY ORIENTATION DIRECTION TOLERANCE RELATIVE TO [A] WITHIN ± 5°.
5. FINISH ON MACHINED EDGES NOT TO EXCEED  $R_{a} 4.0$  (SYMBOLIC IN ACCORDANCE WITH ASA B46.1, WITH ROUGHNESS HEIGHT IN MICROINCHES.)
5. VALUES TO BE PROVIDED FOR THE FOLLOWING, SUBJECT TO ANY RANGES SHOWN ON THE FIELD OF DRAWING: MATERIAL, LAY-UP, PLY ORIENTATION REFERENCE RELATIVE TO [A], OVERALL LENGTH, GAGE LENGTH, COUPON THICKNESS, TAB MATERIAL, TAB THICKNESS, TAB LENGTH, TAB BEVEL ANGLE, TAB ADHESIVE.
6. NO ADHESIVE BULDPUP ALLOWED IN THIS AREA.



**FIG. 3 Tension Test Specimen Drawing (Inch-pound)**

elevated temperature testing of a moist specimen place unrealistic requirements on the capabilities of common testing machine environmental chambers. In such cases, the mechanical test environment may need to be modified, for example, by testing at elevated temperature with no fluid exposure control, but with a specified limit on time to failure from withdrawal from the conditioning chamber. Modifications to the test environment shall be recorded.

11.4.1 Store the specimen in the conditioned environment until test time, if the testing area environment is different than the conditioning environment.

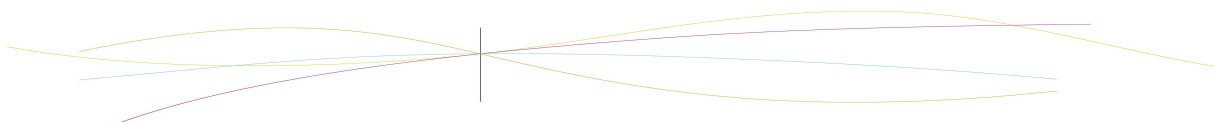
11.5 *Specimen Insertion*—Place the specimen in the grips of the testing machine, taking care to align the long axis of the gripped specimen with the test direction. Tighten the grips, recording the pressure used on pressure controllable (hydraulic or pneumatic) grips.

NOTE 7—The ends of the grip jaws on wedge-type grips should be even with each other following insertion to avoid inducing a bending moment that results in premature failure of the specimen at the grip. When using

untabbed specimens, a folded strip of medium grade (80 to 150 grit) emery cloth between the specimen faces and the grip jaws (grit-side toward specimen) provides a nonslip grip on the specimen without jaw serration damage to the surface of the specimen. When using tabbed specimens, insert the coupon so that the grip jaws extend approximately 10 to 15 mm [0.5 in.] past the beginning of the tapered portion of the tab. Coupons having tabs that extend beyond the grips are prone to failure at the tab ends because of excessive interlaminar stresses.

11.6 *Transducer Installation*—If strain response is to be determined attach the strain-indication transducer(s) to the specimen, symmetrically about the mid-span, mid-width location. Attach the strain-recording instrumentation to the transducers on the specimen.

11.6.1 When determining modulus of elasticity, it is recommended that at least one specimen per like sample be evaluated with back-to-back axial transducers to evaluate the percent bending, using Eq 5, at the average axial strain checkpoint value (the mid range of the appropriate chord modulus strain range) shown in Table 3. A single transducer can be used if the



 D 3039/D 3039M – 00<sup>1</sup>

**TABLE 3 Specimen Alignment and Chord Modulus Calculation Strain Ranges**

Tensile Chord Modulus Calculation Longitudinal Strain Range		Longitudinal Strain Checkpoint for Bending
Start Point	End Point	
$\mu\text{m}^A$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$
1000 <sup>B</sup>	5000	2000

<sup>A</sup> 1000  $\mu\text{m}$  = 0.001 absolute strain.  
<sup>B</sup> This strain range is to be contained in the lower half of the stress/strain curve. For materials that fall below 8000  $\mu\text{m}$ , a strain range of 25 to 50 % of ultimate is recommended.

percent bending is no more than 3 %. When bending is greater than 3 % averaged strains from back-to-back transducers of like kind are recommended.

$$B_y = \frac{|e_f - e_b|}{|e_f + e_b|} \quad (5)$$

where:

- $e_f$  = indicated strain from front transducer,  $\mu\text{e}$ ;
- $e_b$  = indicated strain from back transducer,  $\mu\text{e}$ ; and
- $B_y$  = percent bending in specimen.

**11.7 Loading**—Apply the load to the specimen at the specified rate until failure, while recording data.

**11.8 Data Recording**—Record load versus strain (or transducer displacement) continuously or at frequent regular intervals. If a transition region or initial ply failures are noted, record the load, strain, and mode of damage at such points. If the specimen is to be failed, record the maximum load, the failure load, and the strain (or transducer displacement) at, or as near as possible to, the moment of rupture.

**NOTE 8**—Other valuable data that can be useful in understanding testing anomalies and gripping or specimen slipping problems includes load versus head displacement data and load versus time data.

**11.9 Failure Mode**—Record the mode and location of failure of the specimen. Choose, if possible, a standard description using the three-part failure mode code that is shown in Fig. 4.

**11.10 Grip/Tab Failures**—Reexamine the means of load introduction into the material if a significant fraction of failures in a sample population occur within one specimen width of the tab or grip. Factors considered should include the tab alignment, tab material, tab angle, tab adhesive, grip type, grip pressure, and grip alignment.

**12. Calculation**

**12.1 Tensile Stress/Tensile Strength**—Calculate the ultimate tensile strength using Eq 6 and report the results to three significant figures. If the tensile modulus is to be calculated, determine the tensile stress at each required data point using Eq 7.

$$F^m = P^m/A \quad (6)$$

$$\sigma_i = P_i/A \quad (7)$$

where:

- $F^m$  = ultimate tensile strength, MPa [psi];
- $P^m$  = maximum load before failure, N [lbf];
- $\sigma_i$  = tensile stress at  $i$ th data point, MPa [psi];
- $P_i$  = load at  $i$ th data point, N [lbf]; and
- $A$  = average cross-sectional area from 11.2.3,  $\text{mm}^2$  [ $\text{in}^2$ ].

**12.2 Tensile Strain/Ultimate Tensile Strain**—If tensile modulus or ultimate tensile strain is to be calculated, and material response is being determined by an extensometer, determine the tensile strain from the indicated displacement at each required data point using Eq 8 and report the results to three significant figures.

$$\epsilon_i = \delta_i/L_g \quad (8)$$

where:

- $\epsilon_i$  = tensile strain at  $i$ th data point,  $\mu\text{e}$ ;
- $\delta_i$  = extensometer displacement at  $i$ th data point, mm [in.]; and
- $L_g$  = extensometer gage length, mm [in.].

**12.3 Tensile Modulus of Elasticity**

**NOTE 9**—To minimize potential effects of bending it is recommended that the strain data used for modulus of elasticity determination be the average of the indicated strains from each side of the specimen, as discussed in 7.3 and 11.6.

**12.3.1 Tensile Chord Modulus of Elasticity**—Select the appropriate chord modulus strain range from Table 3. Calculate the tensile chord modulus of elasticity from the stress-strain data using Eq 9. If data is not available at the exact strain range end points (as often occurs with digital data), use the closest available data point. Report the tensile chord modulus of elasticity to three significant figures. Also report the strain range used in the calculation. A graphical example of chord modulus is shown in Fig. 5.

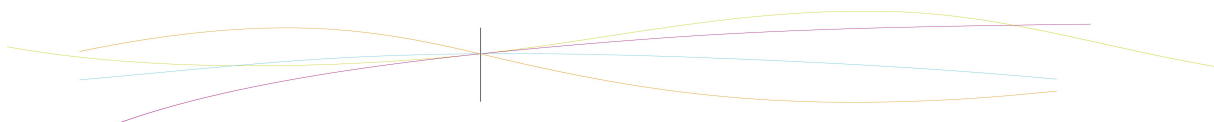
**12.3.1.1** The tabulated strain ranges should only be used for materials that do not exhibit a transition region (a significant change in the slope of the stress-strain curve) within the given strain range. If a transition region occurs within the recommended strain range, then a more suitable strain range shall be used and reported.

$$E^{\text{chord}} = \Delta\sigma/\Delta\epsilon \quad (9)$$

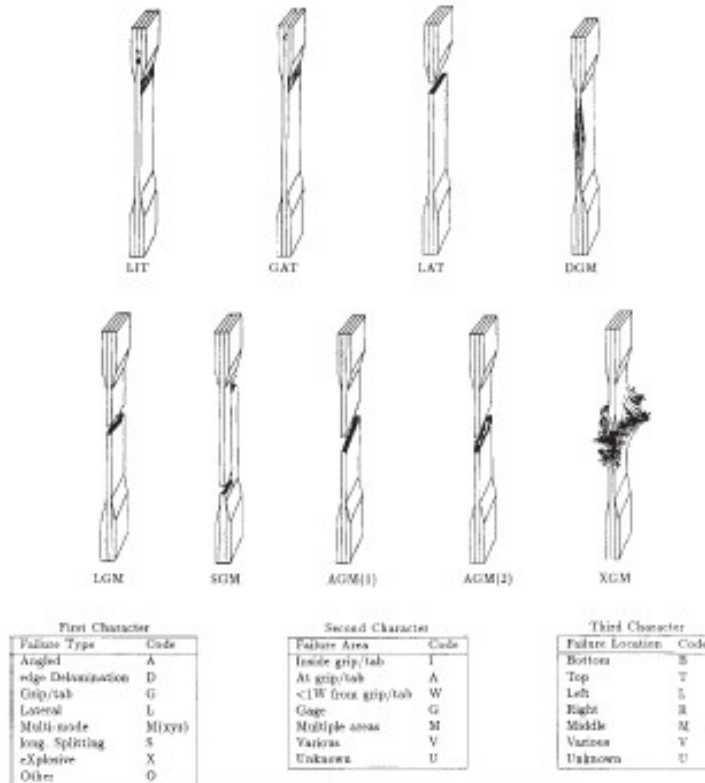
where:

- $E^{\text{chord}}$  = tensile chord modulus of elasticity, GPa [psi];
- $\Delta\sigma$  = difference in applied tensile stress between the two strain points of Table 3, MPa [psi]; and
- $\Delta\epsilon$  = difference between the two strain points of Table 3 (nominally 0.002).

**12.3.2 Tensile Modulus of Elasticity (Other Definitions)**—Other definitions of elastic modulus may be evaluated and reported at the user's discretion. If such data is generated and reported, report also the definition used, the strain range used,



**D 3039/D 3039M - 00<sup>1</sup>**



**FIG. 4 Tensile Test Failure Codes/Typical Modes**

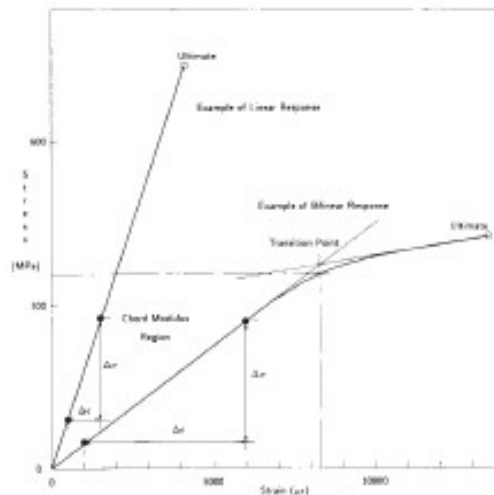
and the results to three significant figures. Test Method E 111 provides additional guidance in the determination of modulus of elasticity.

**NOTE 10**—An example of another modulus definition is the secondary chord modulus of elasticity for materials that exhibit essentially bilinear stress-strain behavior. An example of secondary chord modulus is shown in Fig. 5.

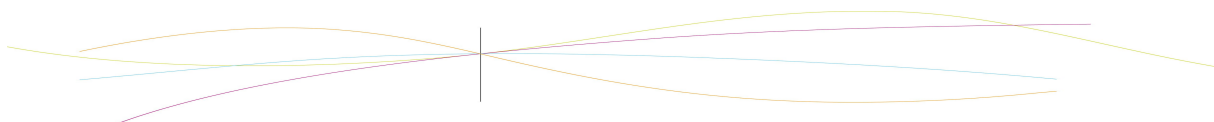
**12.4 Poisson's Ratio:**

**NOTE 11**—If bonded resistance strain gages are being used, the error produced by the transverse sensitivity effect on the transverse gage will generally be much larger for composites than for metals. An accurate measurement of Poisson's ratio requires correction for this effect. The strain gage manufacturer should be contacted for information on the use of correction factors for transverse sensitivity.

**12.4.1 Poisson's Ratio By Chord Method**—Select the appropriate chord modulus longitudinal strain range from Table 3. Determine (by plotting or otherwise) the transverse strain (measured perpendicular to the applied load),  $\epsilon_t$ , at each of the two longitudinal strains (measured parallel to the applied load),  $\epsilon_l$ , strain range end points. If data is not available at the exact strain range end points (as often occurs with digital data), use



**FIG. 5 Typical Tensile Stress-Strain Curves**





**D 3039/D 3039M – 00\*1**

the closest available data point. Calculate Poisson's ratio by Eq 10 and report to three significant figures. Also report the strain range used.

$$\nu = -\Delta\epsilon_y/\Delta\epsilon_x \tag{10}$$

where:

- $\nu$  = Poisson's ratio;
- $\Delta\epsilon_y$  = difference in lateral strain between the two longitudinal strain points of Table 3,  $\mu\epsilon$ ; and
- $\Delta\epsilon_x$  = difference between the two longitudinal strain points of Table 3 (nominally either 0.001, 0.002, or 0.005).

**12.4.2 Tensile Poisson's Ratio (Other Definitions)**—Other definitions of Poisson's ratio may be evaluated and reported at the user's direction. If such data is generated and reported, report also the definition used, the strain range used, and the results to three significant figures. Test Method E 132 provides additional guidance in the determination of Poisson's ratio.

**12.5 Transition Strain**—Where applicable, determine the transition strain from either the bilinear longitudinal stress versus longitudinal strain curve or the bilinear transverse strain versus longitudinal strain curve. Create a best linear fit or chord line for each of the two linear regions and extend the lines until they intersect. Determine to three significant digits the longitudinal strain that corresponds to the intersection point and record this value as the transition strain. Report also the method of linear fit (if used) and the strain ranges over which the linear fit or chord lines were determined. A graphical example of transition strain is shown in Fig. 5.

**12.6 Statistics**—For each series of tests calculate the average value, standard deviation and coefficient of variation (in percent) for each property determined:

$$\bar{x} = (\sum_{i=1}^n x_i)/n \tag{11}$$

$$s_{n-1} = \sqrt{(\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}^2)/(n-1)} \tag{12}$$

$$CV = 100 \times s_{n-1} / \bar{x} \tag{13}$$

where:

- $\bar{x}$  = sample mean (average);
- $s_{n-1}$  = sample standard deviation;
- $CV$  = sample coefficient of variation, in percent;
- $n$  = number of specimens; and
- $x_i$  = measured or derived property.

**13. Report**

13.1 Report the following information, or references pointing to other documentation containing this information, to the maximum extent applicable (reporting of items beyond the control of a given testing laboratory, such as might occur with material details or panel fabrication parameters, shall be the responsibility of the requestor):

- 13.1.1 The revision level or date of issue of this test method.
- 13.1.2 The date(s) and location(s) of the test.
- 13.1.3 The name(s) of the test operator(s).

13.1.4 Any variations to this test method, anomalies noticed during testing, or equipment problems occurring during testing.

13.1.5 Identification of the material tested including: material specification, material type, material designation, manufacturer, manufacturer's lot or batch number, source (if not from manufacturer), date of certification, expiration of certification, filament diameter, tow or yarn filament count and twist, sizing, form or weave, fiber areal weight, matrix type, prepreg matrix content, and prepreg volatiles content.

13.1.6 Description of the fabrication steps used to prepare the laminate including: fabrication start date, fabrication end date, process specification, cure cycle, consolidation method, and a description of the equipment used.

13.1.7 Ply orientation stacking sequence of the laminate.

13.1.8 If requested, report density, volume percent reinforcement, and void content test methods, specimen sampling method and geometries, test parameters, and test results.

13.1.9 Average ply thickness of the material.

13.1.10 Results of any nondestructive evaluation tests.

13.1.11 Method of preparing the test specimen, including specimen labeling scheme and method, specimen geometry, sampling method, coupon cutting method, identification of tab geometry, tab material, and tab adhesive used.

13.1.12 Calibration dates and methods for all measurement and test equipment.

13.1.13 Type of test machine, grips, jaws, grip pressure, alignment results, and data acquisition sampling rate and equipment type.

13.1.14 Results of system alignment evaluations, if any such were done.

13.1.15 Dimensions of each test specimen.

13.1.16 Conditioning parameters and results, use of travelers and traveler geometry, and the procedure used if other than that specified in the test method.

13.1.17 Relative humidity and temperature of the testing laboratory.

13.1.18 Environment of the test machine environmental chamber (if used) and soak time at environment.

13.1.19 Number of specimens tested.

13.1.20 Speed of testing.

13.1.21 Transducer placement on the specimen and transducer type for each transducer used.

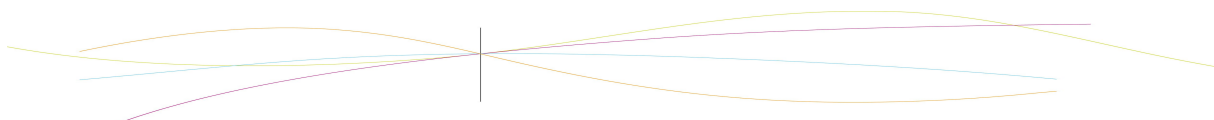
13.1.22 If strain gages were used, the type, resistance, size, gage factor, temperature compensation method, transverse sensitivity, lead-wire resistance, and any correction factors used.


13.1.23 Stress-strain curves and tabulated data of stress versus strain for each specimen.

13.1.24 Percent bending results for each specimen so evaluated.

13.1.25 Individual strengths and average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population. Note if the failure load was less than the maximum load before failure.

13.1.26 Individual strains at failure and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.



 D 3039/D 3039M – 00<sup>1</sup>

13.1.27 Strain range used for chord modulus and Poisson's ratio determination.

13.1.28 If another definition of modulus of elasticity is used in addition to chord modulus, describe the method used, the resulting correlation coefficient (if applicable), and the strain range used for the evaluation.

13.1.29 Individual values of modulus of elasticity, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

13.1.30 If another definition of Poisson's ratio is used in addition to the chordwise definition, describe the method used, the resulting correlation coefficient (if applicable), and the strain range used for the evaluation.

13.1.31 Individual values of Poisson's ratio, and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

13.1.32 If transition strain is determined, the method of linear fit (if used) and the strain ranges over which the linear fit or chord lines were determined.

13.1.33 Individual values of transition strain (if applicable), and the average value, standard deviation, and coefficient of variation (in percent) for the population.

13.1.34 Failure mode and location of failure for each specimen.

**14. Precision and Bias**

**14.1 Precision:**

14.1.1 The precision and bias of tension test strength and modulus measurements depend on strict adherence to the Test Method D 3039/D 3039M and are influenced by mechanical and material factors, specimen preparation, and measurement errors.

14.1.2 Mechanical factors that can affect the test results include: the physical characteristics of the testing machine (stiffness, damping, and mass), accuracy of loading and displacement/strain measurement, speed of loading, alignment of test specimen with applied load, parallelism of the grips, grip pressure, and type of load control (displacement, strain, or load).

14.1.3 Material factors that can affect test results include: material quality and representativeness, sampling scheme, and specimen preparation (dimensional accuracy, tab material, tab taper, tab adhesive, and so forth).

14.1.4 The mean tensile strength for a strain rate sensitive, glass/epoxy tape composite testing in the fiber direction was found to increase by approximately two standard deviations with decreasing time to failure tested at the limits of the recommended time to failure prescribed in Test Method D 3039/D 3039M. This result suggest that caution must be used when comparing test data obtained for strain rate sensitive composite materials tested in accordance with this standard.

14.1.5 Measurement errors arise from the use of specialized measuring instruments such as load cells, extensometers and strain gages, micrometers, data acquisition devices, and so forth.

14.1.6 Data obtained from specimens that fracture outside the gage are should be used with caution as this data may not be representative of the material. Failure in the grip region indicates the stress concentration at the tab is greater than the

natural strength variation of the material in the gage section. A tapered tab, bonded with a ductile low-modulus adhesive has a relatively low-stress concentration and should result in the lowest frequency of grip failures. Low-strength bias increases with the frequency of grip failures by an amount proportional to the stress concentration at the tab.

14.1.7 An interlaboratory test program was conducted where an average of five specimens each, of six different materials and lay-up configurations, were tested by nine different laboratories.<sup>10</sup> Table 4 presents the precision statistics generated from this study as defined in Practice E 691 for tensile strength, modulus, and failure strain. All data except that for Material B (90° lay-up) was normalized with respect to an average thickness. The materials listed in Table 15 are defined as:

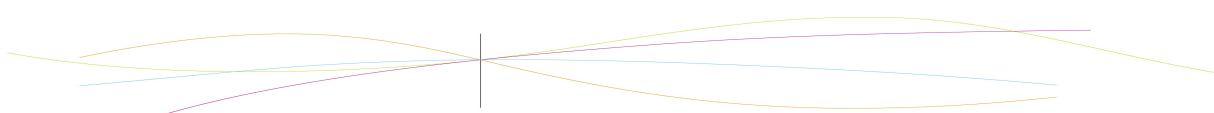
- A IM-6/3501-6 uni-tape (0)n
- B IM-6/3501-6 uni-tape (90)n
- C IM-6/3501-6 uni-tape (90/0)n
- F Glass/epoxy fabric (7781 glass/Ciba R 7376 Epoxy)-warp aligned
- G Carbon/epoxy fabric (66108 carbon/Ciba R 6376

**TABLE 4 Precision Statistics**

Material	$\bar{x}$	$s/\bar{x}$	$S_1$	$S_2$	$S_1/\bar{x}$ , %	$S_2/\bar{x}$ , %
Strength, ksi						
A	342.89	8.49	10.88	12.78	3.12	3.73
B	8.52	0.52	0.85	0.92	9.94	10.84
C	158.37	3.84	10.85	10.85	6.94	6.94
F	88.18	3.20	1.52	3.48	2.30	5.28
G	121.52	1.59	3.62	3.62	3.23	3.23
Modulus, Msi						
A	23.57	0.65	0.63	0.88	2.69	3.68
B	1.30	0.05	0.04	0.08	3.12	4.57
C	12.38	0.29	0.37	0.44	2.98	3.54
F	3.95	0.08	0.04	0.09	1.01	2.28
G	9.47	0.18	0.12	0.20	1.29	2.08
Failure Strain, %						
A	1.38	0.08	0.07	0.08	4.95	6.15
B	0.68	0.04	0.08	0.09	12.47	13.02
C	1.22	0.03	0.06	0.06	5.25	5.27
F	2.04	0.15	0.07	0.18	3.19	8.03
G	1.27	0.03	0.05	0.05	3.83	4.13

14.1.8 The averages of the coefficients of variation are in Table 5. The values of  $S_1/\bar{x}$  and  $S_2/\bar{x}$  represent the repeatability and the reproducibility coefficients of variation, respectively. These averages permit a relative comparison of the repeatability (within laboratory precision) and reproducibility (between laboratory precision) of the tension test parameters. Overall, this indicates that the failure strain measurements exhibit the least repeatability and reproducibility of all the parameters measured while modulus was found to provide the highest repeatability and reproducibility of the parameters measured.

<sup>10</sup> International Harmonization of Composite Materials—Phase 1: Harmonization of ASTM D 3039/D 3039M and ISO 527-5, Final Report, ASTM Institute for Standards Research, April 1997.



 D 3039/D 3039M – 00<sup>1</sup>

TABLE 5 Averages of the Coefficients of Variation

Parameter	Average of $S_j/X$ , %	Average of $S_w/X$ , %
Strength	5.11	6.00
Modulus	2.22	3.22
Failure strain	5.94	7.32

14.1.9 The consistency of agreement for repeated tests of the same material is dependent on lay-up configuration, mate-

rial and specimen preparation techniques, test conditions, and measurements of the tension test parameters.

14.2 *Bias*—Bias cannot be determined for this test method as no acceptable reference standard exists.

15. Keywords

15.1 composite materials; modulus of elasticity; Poisson's ratio; tensile properties; tensile strength

*ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.*

*This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.*

*This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2958, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 810-832-0555 (phone), 810-832-0555 (fax), or service@astm.org (e-mail), or through the ASTM website (www.astm.org).*

