

N° d'ordre

# THESE DE DOCTORAT

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

en vue de l'obtention du titre de

## DOCTEUR

en

### CHIMIE ORGANIQUE ET MACROMOLECULAIRE

Spécialité Polymères à l'Etat Solide

par

### Cyril TAMIATTO

Titulaire du D.E.A. Polymères de l'Université Bordeaux I

**CONCEPTION ET ANALYSE DU COMPORTEMENT D'UN  
COMPOSITE A CAPTEUR INTEGRE EN FIBRES DE CARBONE  
POUR LA DETECTION IN-SITU DES ENDOMMAGEMENTS D'UNE  
STRUCTURE VERRE/RESINE**

Soutenue le 17 Novembre 1998 devant le jury :

Rapporteurs :	M <sup>me</sup>	M. GUIGON
	M <sup>lle</sup>	C. LACABANNE
Examineurs :	M.	C. CAZE
	M <sup>me</sup>	L. TIGHZERT
	M.	H. DUFRESNOY
	M <sup>lle</sup>	P. KRAWCZAK
	M.	J. PABIOT

Laboratoire d'accueil :

Département Technologie des Polymères et Composites de l'Ecole des Mines de Douai

Directeur de thèse :

M. J. PABIOT, Professeur et responsable du laboratoire d'accueil

## REMERCIEMENTS :

Ce travail de recherche a été effectué au Département Technologie des Polymères et Composites de l'Ecole des Mines de Douai sous la direction du Professeur J. Pabiot.

Par ailleurs ce travail a été conduit en étroite collaboration avec la Société Stratiforme Industries et a été financé en partie par la région Nord Pas de Calais.

Je tiens tout d'abord à remercier particulièrement Monsieur le Professeur J. Pabiot de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et d'avoir suivi et encadré mon travail de recherche.

Je remercie également Messieurs H. Dufresnoy et F. Laurent de la société Stratiforme Industries pour la fourniture des matériaux et la réalisation des éprouvettes instrumentés. En outre, je suis reconnaissant à Monsieur H. Dufresnoy d'avoir accepté de participer au jury de thèse.

J'exprime toute ma reconnaissance à Monsieur le Professeur C. Cazé de l'Université des Sciences et Technologies de Lille pour le très grand honneur qu'il me fait en présidant le jury de cette thèse.

Je suis également sensible à l'intérêt que Madame le Professeur M. Guigon de l'Université de Technologie de Compiègne et Mademoiselle le Professeur C. Lacabanne de l'Université Paul Sabatier de Toulouse ont porté à ce travail en acceptant d'être les rapporteurs de ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi aux membres du laboratoire Composite et en premier lieu à Mademoiselle P. Krawczak pour l'aide précieuse et le soutien qu'elle m'a apporté tout au long de mon travail de recherche. Je remercie également Christophe Binétruy pour ses conseils enrichissants ainsi que Patrice Hulot et Bruno Rémy pour leur aide lors de la mise en oeuvre des essais expérimentaux.

# SOMMAIRE

<b>SITUATION DU PROBLEME .....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE EN VUE DU CHOIX D'UN CAPTEUR D'ENDOMMAGEMENT.....</b>	<b>3</b>
<b>1.1. ENDOMMAGEMENT D'UN MATERIAU COMPOSITE .....</b>	<b>3</b>
<b>1.2. FIBRES OPTIQUES.....</b>	<b>5</b>
1.2.1. Définitions .....	5
1.2.2. Mesure d'intensité .....	6
1.2.2.1. Principe de la mesure.....	6
1.2.2.2. Résultats obtenus.....	6
1.2.2.3. Applications.....	9
1.2.3. Mesure de déphasage .....	11
1.2.3.1. Principe de mesure .....	11
1.2.3.2. Interféromètre de Michelson .....	13
1.2.3.3. Interféromètre de Fabry-Pérot .....	15
1.2.3.4. Fibre polarisée et fibre multimode .....	17
1.2.4. Mesure de longueur d'onde : réseau de Bragg .....	17
1.2.5. Problèmes rencontrés avec les capteurs à fibres optiques.....	21
1.2.5.1. Problèmes liés aux interféromètres .....	21
1.2.5.2. Problèmes d'intégration de la fibre optique dans le matériau.....	21
<b>1.3. MATERIAUX ELECTROCERAMIQUES.....</b>	<b>23</b>
1.3.1. Principe et définitions.....	23
1.3.2. Capteurs électrocéramiques classiques .....	25
1.3.3. Films et fibres piézo-électriques .....	26
1.3.3.1. Films.....	26
1.3.3.2. Fibres piézo-électriques.....	27
<b>1.4. FIBRES DE CARBONE.....</b>	<b>29</b>
1.4.1. Principe : utilisation des propriétés électriques des fibres de carbone.....	29
1.4.2. Utilisation de fibres coupées .....	30
1.4.3. Utilisation des fibres de renfort continues d'un composite carbone/résine .....	31
1.4.3.1. Modélisation électrique d'un composite à renfort unidirectionnel.....	31
1.4.3.2. Résultats expérimentaux.....	34
1.4.3.2.1. Essais de délaminage .....	34
1.4.3.2.2. Essais de flexion .....	36

1.4.3.2.3. Essais en traction statique .....	37
1.4.3.2.4. Essais sous chargement de fatigue.....	38
1.4.3.2.5. Influence de la température.....	39
1.4.4. Application à un composite fibre de verre/résine .....	40
<b>1.5. CONCLUSION : CHOIX D'UN CAPTEUR ET PROGRAMME DE RECHERCHE .....</b>	<b>43</b>
<b>CHAPITRE II :MATERIAUX ET MOYENS EXPERIMENTAUX.....</b>	<b>44</b>
<b>2.1. MATERIAUX ET STRUCTURES.....</b>	<b>44</b>
2.1.1. Mèches de carbone utilisées comme capteurs d'endommagement résistifs ....	44
2.1.2. Eprouvettes.....	44
2.1.2.1. Descriptif.....	44
2.1.2.2. Fabrication.....	46
2.1.3. Tubes .....	47
2.1.4. Sièges pour transport ferroviaire .....	48
<b>2.2. MOYENS EXPERIMENTAUX.....</b>	<b>49</b>
2.2.1. Mesure de la résistance électrique des fibres de carbone.....	49
2.2.1.1. Pont diviseur.....	49
2.2.1.2. Nano-ohmètre .....	50
2.2.2. Mesure de l'émission acoustique.....	50
2.2.2.1. Principes généraux de l'émission acoustique.....	50
2.2.2.2. Principe de mesure .....	51
2.2.3. Essais de traction.....	52
2.2.4. Essais de flexion.....	52
2.2.5. Essais de cisaillement.....	53
2.2.6. Essais de fatigue .....	53
2.2.6.1. Essais de fatigue à amplitude de flèche constante en flexion trois points.....	53
2.2.6.2. Essais de fatigue à amplitude de contrainte constante en traction.....	55
2.2.7. Essais sur tubes.....	55
2.2.7.1. Essai instantané sous pression interne croissante.....	55
2.2.7.2. Essai en fatigue dynamique sous pression interne .....	56
<b>CHAPITRE III : VALIDATION DU CAPTEUR SUR EPROUVETTES.....</b>	<b>58</b>
<b>3.1. VALIDATION DU CAPTEUR EN TRACTION MONOAXIALE MONOTONE.....</b>	<b>58</b>
3.1.1. Faisabilité : essai avec des mèches de carbone d'allongement à la rupture 2,1 % .....	58
3.1.2. Comparaison des réponses obtenues avec des mèches de carbone d'allongements à la rupture différents.....	61
3.1.2.1. Mèche d'allongement à la rupture 1,5/1,7 % .....	61



3.1.2.2. Mèche d'allongement à la rupture 0,6 %.....	62
3.1.2.3. Mèche d'allongement à la rupture 0,36 %.....	63
3.1.2.4. Analyse comparée .....	64
<b>3.1.3. Analyse des différentes contributions causant l'augmentation de</b>	
<b>résistance électrique .....</b>	<b>65</b>
3.1.3.1. Contribution due à l'élongation des fibres .....	65
3.1.3.1.1. Calcul de la résistance électrique due à l'élongation.....	65
3.1.3.1.2. Comparaison calcul/expérience .....	66
3.1.3.2. Contribution due à la rupture des fibres .....	68
<b>3.1.4. Reproductibilité des mesures .....</b>	<b>69</b>
3.1.4.1. Comparaison pour les différents types de fibres .....	69
3.1.4.2. Divergence des courbes aux fortes déformations .....	73
3.1.4.3. Influence de la tension des mèches de carbone .....	74
<b>3.1.5. Influence du titre de la mèche de carbone.....</b>	<b>75</b>
3.1.5.1. Influence sur la reproductibilité des mesures .....	75
3.1.5.2. Influence sur la pente à l'origine des courbes de résistance électrique .....	78
3.1.5.3. Décalage des courbes vers les fortes déformations .....	79
3.1.5.4. Titres à utiliser préférentiellement.....	80
<b>3.1.6. Influence du matériau hôte sur la réponse du capteur .....</b>	<b>80</b>
<b>3.1.7. Influence des mèches de carbone sur les caractéristiques mécaniques</b>	
<b>du matériau hôte .....</b>	<b>81</b>
<b>3.1.8. Influence des conditions d'environnement .....</b>	<b>84</b>
3.1.8.1. Influence de l'humidité relative.....	84
3.1.8.2. Influence de la température .....	84
3.1.8.2.1. Fibre 0,6 %.....	84
3.1.8.2.2. Fibres 0,36 % .....	86
3.1.8.2.3. Facteurs correctifs.....	87
<b>3.1.9. Synthèse de l'étude en traction monoaxiale.....</b>	<b>88</b>
<b>3.2. APPLICATION A D'AUTRES MODES DE SOLLICITATION.....</b>	<b>89</b>
<b>3.2.1. Autres sollicitations statiques .....</b>	<b>89</b>
3.2.1.1. Flexion.....	89
3.2.1.1.1. Analyse comparée pour différents types de mèches de carbone .....	89
3.2.1.1.2. Interprétation de l'allure des courbes de résistance électrique obtenues	
en flexion .....	92
3.2.1.1.3. Reproductibilité des mesures .....	94
3.2.1.1.4. Influence des capteurs sur le comportement mécanique du matériau hôte .....	95
3.2.1.1.5. Synthèse des essais de flexion .....	95
3.2.1.2. Cisaillement interlaminaire .....	96
3.2.1.2.1. Mèches de carbone translaminaires .....	96
3.2.1.2.2. Mèches de carbone parallèles aux plis de l'éprouvette .....	98
3.2.1.2.3. Influence de l'intégration des mèches de carbone sur la résistance	
au délaminage de l'éprouvette .....	102
3.2.1.2.4. Synthèse des essais de cisaillement interlaminaire.....	102

3.2.2. Chargement dynamique.....	103
3.2.2.1. Chargement répété progressif.....	103
3.2.2.1.1. Résultats pour différents types de mèches de carbone .....	103
3.2.2.1.2. Analyse comparée pour les différentes mèches de carbone .....	112
3.2.2.1.3. Détermination du taux de remise en contact des fibres de carbone rompues.....	115
3.2.2.1.3. Influence du temps après déchargement sur la résistance électrique résiduelle .....	118
3.2.2.1.5. Intérêt de la résistance électrique résiduelle pour le capteur d'endommagement.....	120
3.2.2.2. Chargement répété d'amplitude constante (fatigue) .....	122
3.2.2.2.1. Fatigue à amplitude de flèche imposée (flexion en appuis trois points) .....	122
3.2.2.2.2. Fatigue à amplitude de contrainte imposée (traction) .....	129
3.2.2.2.3. Synthèse des essais de fatigue .....	135
<b>3.3. CONCLUSION DE L'ETUDE SUR EPROUVETTE.....</b>	<b>135</b>
<b>CHAPITRE IV : DISCUSSION ET DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL.....</b>	<b>137</b>
<b>4.1. ANALYSE DE LA REPONSE DU CAPTEUR .....</b>	<b>137</b>
4.1.1. Qu'est-ce que mesure réellement le capteur ?.....	137
4.1.2. Relation entre résistance électrique mesurée par le capteur et endommagement du matériau .....	137
4.1.3. Les différentes manières de traiter la réponse d'un capteur pour un chargement en traction croissant dans le sens de la mèche.....	139
4.1.3.1. Effet fusible .....	139
4.1.3.1.1. Pièce instrumentée sous charge .....	139
4.1.3.1.2. Utilisation de la résistance électrique résiduelle.....	140
4.1.3.2. Utilisation de l'augmentation de la résistance électrique due à l'élongation des fibres.....	140
4.1.3.3. Utilisation de l'augmentation de la résistance électrique due à la rupture des fibres de carbone pour une acquisition en continu .....	141
4.1.4. Influence de la loi de chargement et de l'orientation du chargement sur la réponse électrique de la mèche de carbone .....	143
<b>4.2. MODELISATION DE LA REPONSE DU CAPTEUR.....</b>	<b>145</b>
4.2.1. Modélisation de l'augmentation de résistance électrique due à l'élongation des fibres de carbone.....	145
4.2.2. Modélisation de l'augmentation de résistance électrique due à la rupture des fibres de carbone.....	149
4.2.2.1. Modélisation de la rupture des fibres de carbone .....	149
4.2.2.1.1. Théorie du maillon le plus faible .....	149
4.2.2.1.2. Modélisation d'essai de traction sur monofilament.....	149
4.2.2.1.3. Modélisation d'essais de traction sur fibre imprégnée (test de multifragmentation) .....	150

4.2.2.2. Relation entre le nombre de fibres de carbone rompues et la résistance électrique : problème de la conductibilité transverse .....	151
4.2.2.3. Application des modèles pour le calcul des courbes résistance électrique/déformation.....	154
4.2.2.3.1. Distribution de Weibull .....	154
4.2.2.3.2. Distribution sigmoïdale.....	157
4.2.2.4. Conclusion : application de la modélisation.....	159
<b>4.3. VALIDATION DES CAPTEURS SUR PIÈCES INDUSTRIELLES.....</b>	<b>160</b>
4.3.1. Tubes sous pression interne.....	160
4.3.1.1. Lois de comportement des tubes sous pression interne.....	160
4.3.1.2. Emplacement et nature des mèches de carbone servant de capteurs .....	161
4.3.1.3. Résultats en éclatement instantané .....	164
4.3.1.3.1. Capteur axial .....	164
4.3.1.3.2. Capteur circonférentiel .....	165
4.3.1.3.3. Application sur les tubes de la modélisation de la réponse électrique du capteur .....	168
4.3.1.4. Résultats sous chargement répété progressif.....	170
4.3.1.5. Résultats en fatigue dynamique.....	172
4.3.1.6. Bilan des essais sur tubes .....	173
4.3.2. Sièges pour transport ferroviaire sous chargement de fatigue .....	174
4.3.2.1. Etude des caractéristiques mécaniques du matériau pour le choix et le positionnement des capteurs d'endommagement .....	174
4.3.2.2. Résultats .....	178
4.3.2.3. Interprétation de la discontinuité de déformation au niveau de la jauge lors de l'apparition de la fissure.....	180
4.3.2.4. Bilan des essais sur sièges .....	183
<b>CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>184</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>187</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>195</b>

**SITUATION DU  
PROBLEME**

## **SITUATION DU PROBLEME**

Les matériaux composites à renfort filamentaire et matrice polymère présentent des atouts mécaniques et physiques, liés à leur légèreté, leur anisotropie et leur résistance à la corrosion, qui justifient leur utilisation croissante pour la fabrication de pièces techniques et structurales. Ils constituent des matériaux évolués dans le sens où leur conception (choix et orientation des renforts) s'effectue en fonction de la nature, du niveau et de l'orientation des sollicitations mécaniques auxquelles ils sont soumis durant leur phase d'utilisation. Une évolution intéressante de ces matériaux serait de les rendre capables d'autocontrôler leur intégrité mécanique en cours d'utilisation.

Dans l'état actuel des choses, pour contrôler l'endommagement et estimer les propriétés mécaniques résiduelles d'un matériau composite, plusieurs démarches peuvent être adoptées.

Les méthodes classiques de contrôle consistent à faire subir à des matériaux ou des structures types, des programmes de contraintes jusqu'à la ruine finale du matériau afin de déterminer les seuils de tolérance de ce dernier. Cependant, d'une part ces méthodes entraînent la destruction des pièces testées et d'autre part il est nécessaire de garantir l'identité de l'ensemble des pièces produites aux pièces prototypes testées.

Les techniques de contrôle non destructif (C.N.D.) permettent quant à elles de contrôler directement les pièces en production, ainsi qu'à différents stades de leur utilisation. Les techniques les plus utilisées actuellement font appel aux rayons X, aux ultrasons, à l'émission acoustique ou encore aux courants de Foucault. Cependant, ces procédés de contrôle présentent plusieurs inconvénients :

- un investissement lourd
- la difficulté d'utiliser dans de bonnes conditions ces matériels sur sites
- la nécessité d'immobilisation prolongée des installations ou des véhicules à contrôler.

Pour pallier ces problèmes, depuis quelques années des recherches sont menées pour implanter directement des capteurs au sein d'un certain nombre de matériaux, dès leur phase de conception. Ce sont ces nouveaux matériaux, possédant des capteurs intégrés qui sont appelés matériaux "intelligents" ou "smart" matériaux. Ils permettent un suivi continu de leurs propriétés y compris en phase d'utilisation.

Or il s'avère que, les composites, en raison de leur technique de fabrication, plus successifs imprégnés par une résine assurant la cohésion de l'ensemble, constituent un matériau hôte idéal pour l'implantation de capteurs internes.

Dans ce contexte, notre objectif est de mettre au point un matériau composite verre/résine instrumenté avec des capteurs intégrés pouvant suivre en continu

l'endommagement in-situ d'une structure, ce qui constituera un réel progrès en matière de sécurité et de maintenance préventive.

Ce travail de recherche est réalisé conjointement par le Centre de Recherche de l'École des Mines de Douai et la Société Stratiforme Industries, avec le soutien de la Région Nord Pas de Calais, l'une des applications industrielles potentielles envisagées étant la réalisation de pales d'éolienne. Ce type de pièce, soumis à des conditions d'exploitation sévères (vibrations engendrées par la rotation du rotor, arrêts et redémarrages fréquents du rotor, vent, givre, variations de température) nécessite en effet un contrôle poussé de l'endommagement. Un composite "intelligent" peut être une évolution intéressante sous réserve que le capteur retenu soit facile d'utilisation, de technologie simple, économique et altérant le moins possible les propriétés mécaniques du composite hôte tout en détectant avec fiabilité les premières amorces de dégradation.

Aussi afin de répondre à ce cahier des charges, le premier chapitre, après un bref rappel des différents types d'endommagement rencontrés dans les matériaux composites, présente les différents capteurs d'endommagement susceptibles d'être utilisés (fibres optiques, matériaux piézo-électriques et capteurs résistifs), le capteur retenu et le programme de recherche associé.

Le matériau "intelligent" choisi : composite verre/résine avec un capteur résistif intégré (constitué d'une mèche de carbone) est décrit dans le chapitre II, ainsi que l'ensemble des techniques expérimentales utilisées au cours de la recherche (suivi de l'endommagement, caractérisation mécanique).

Puis les résultats obtenus sur éprouvettes sont présentés dans le chapitre III. Une étude de base en traction monoaxiale est d'abord réalisée afin de vérifier l'aptitude du capteur au suivi de l'endommagement, puis étendue à d'autres types de sollicitations statiques et dynamiques. L'ensemble des résultats permet de caractériser la réponse électrique des différents capteurs résistifs intégrés mis en oeuvre.

Enfin, dans le chapitre IV, la réponse électrique des capteurs d'endommagement est analysée et modélisée afin de pouvoir développer l'utilisation de ces capteurs pour des pièces industrielles, une validation étant effectuée sur pièces industrielles simples (tubes) puis plus complexes (sièges).

**CHAPITRE I :**  
**ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE EN**  
**VUE DU CHOIX D'UN CAPTEUR**  
**D'ENDOMMAGEMENT**

# CHAPITRE I :

## ANALYSE BIBLIOGRAPHIQUE EN VUE DU CHOIX D'UN CAPTEUR D'ENDOMMAGEMENT

### 1.1. Endommagement d'un matériau composite

L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui consiste en l'apparition de micro-défauts locaux. Ceux-ci se multiplient par coalescence et conduisent à la création de fissures ou de défauts de taille macroscopique. La conséquence de cet endommagement est en général une diminution notable des caractéristiques mécaniques du matériau.

La connaissance de l'évolution de l'endommagement dans les structures permet de mieux évaluer les sollicitations critiques que peut subir le matériau. Pour ce faire, il faut prendre en compte dans le cas des composites d'une part leur hétérogénéité et d'autre part la multiplicité de leurs modes d'endommagement, ces derniers étant liés soit à la matrice (micro-fissures), soit au renfort (rupture de fibres), soit à l'interface fibre/matrice (décohésion à l'interface).

L'expérience montre que l'on peut distinguer quatre principaux modes d'endommagement :

- Fissurations transverses. Elles correspondent à une rupture de la matrice ou à une décohésion fibre/matrice dans la direction transverse à la direction de la sollicitation.

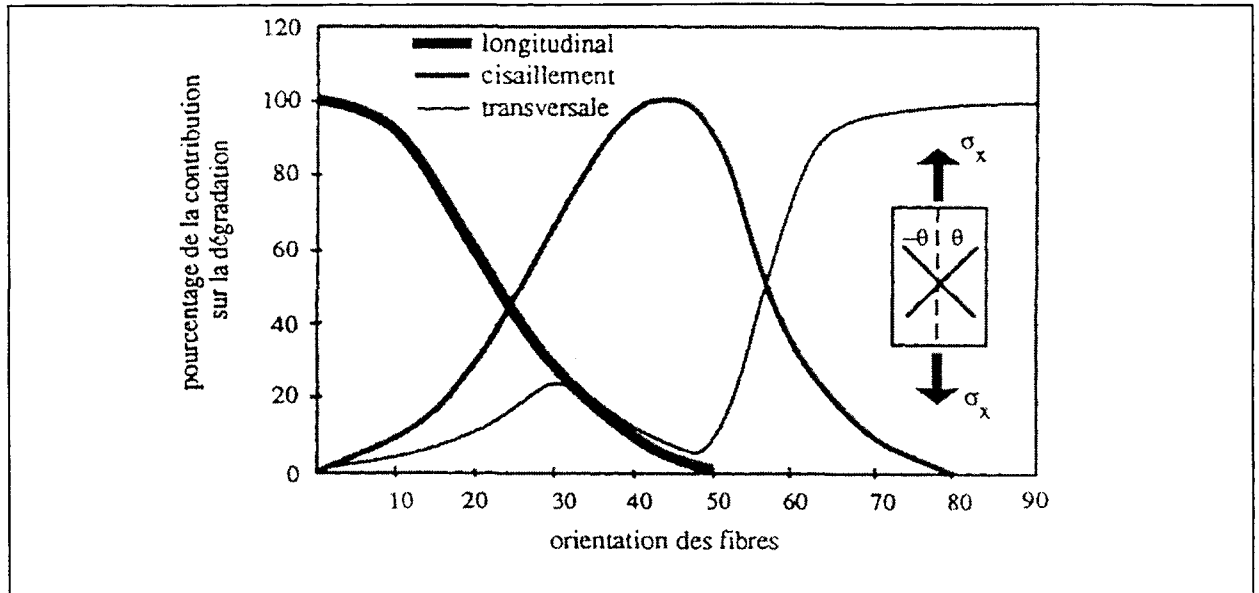
- Délaminage. C'est une séparation locale de deux plis du composite. Elle est due soit à une concentration de contraintes locale près des bords, soit à une densité de fissurations transversales très importante.

- Fissuration longitudinale. Ce mode de fissuration est également lié à la matrice, mais dans ce cas, les fissures sont orientées dans la direction de la sollicitation.

- Rupture des fibres. C'est la conséquence de concentrations de contraintes dues aux trois types d'endommagement précédents. La rupture d'une fibre s'amorce généralement à partir d'un défaut. Lorsqu'une fissure apparaît dans une fibre son instabilité est grande et elle entraîne tout de suite une rupture complète de la fibre. On peut considérer que la rupture de la fibre se fait à partir de l'existence d'un point faible ou d'une surcontrainte locale.



La figure 1-1 présente le pourcentage des différents types d'endommagement, pour des stratifiés soumis à une contrainte de traction, en fonction de l'orientation de leurs fibres de renfort.



**Fig. 1-1 : Contribution de différents types de dégradations pour des stratifiés soumis à une contrainte  $\sigma_x$  [1]**

Il s'agit donc de choisir un capteur susceptible de détecter au mieux l'un ou l'autre de ces types d'endommagement et pouvant s'intégrer facilement au sein du matériau composite. Plusieurs voies ont jusqu'ici été adoptées pour essayer de suivre l'endommagement in-situ de matériaux composites en utilisant divers types de capteurs intégrés comme les fibres optiques, les matériaux piézo-électriques et les capteurs résistifs. Ces matériaux composites instrumentés capables de contrôler en continu certaines de leurs propriétés physiques sont appelés composites "intelligents" ou "smart" composites.

## 1.2. Fibres optiques

### 1.2.1. Définitions

Le principe de base des fibres optiques repose sur le guidage d'un rayon lumineux à l'intérieur de la fibre par réflexion totale.

Les fibres à saut d'indice sont constituées d'une gaine d'indice de réfraction  $n_2$  entourant un coeur d'indice de réfraction  $n_1$ , avec  $n_1 > n_2$ . D'après les lois de l'optique géométrique de Descartes, il y a propagation de la lumière à l'intérieur de la fibre optique par réflexions successives de la lumière sur l'interface coeur/gaine (cf. fig. 1-2).

Pour les fibres à gradient d'indice, l'indice du coeur diminue graduellement depuis l'axe selon une loi parabolique, ce qui permet de ramener tous les temps de propagation des différents rayons lumineux à des valeurs proches les unes des autres.

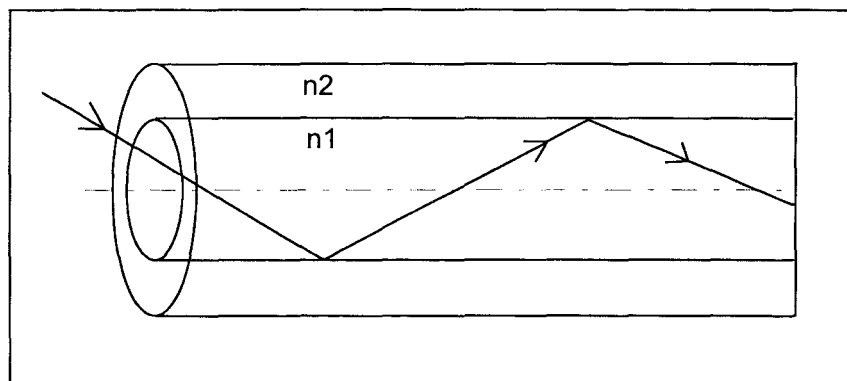


Fig. 1-2 : Principe d'une fibre optique à saut d'indice [2]

On distingue également les fibres multimode et monomode [2]. Dans le cas des fibres multimode le diamètre du coeur des fibres étant assez grand, il y a donc plusieurs trajets possibles pour la lumière suivant l'angle entre l'axe de la fibre et le rayon lumineux et par conséquent plusieurs modes. En revanche dans le cas des fibres monomode, le diamètre du coeur des fibres est très faible (3 à 10  $\mu\text{m}$ ), ce qui permet seulement à un seul mode de passer.

La plupart des fibres optiques sont constituées d'un coeur et d'une gaine en silice. Généralement une deuxième gaine en polymère est ajoutée pour assurer la protection mécanique de la fibre optique. De ce fait, les diamètres des fibres optiques sont compris entre 30  $\mu\text{m}$  et 600  $\mu\text{m}$ .

Pour les applications "composites intelligents", les fibres optiques jouent simultanément le rôle de capteur et de système de transport de l'information. Suivant le procédé utilisé pour suivre l'endommagement du matériau, plusieurs grandeurs peuvent être mesurées: intensité, déphasage ou longueur d'onde.

## 1.2.2. Mesure d'intensité

### 1.2.2.1. Principe de la mesure

Des fibres optiques sont intégrées entre deux plis du composite durant la phase de fabrication. Les ruptures, micro-fissures ou délaminages du matériau entraînent la fissuration de la fibre optique. Cela provoque une interruption de la lumière transmise par la fibre optique et une chute complète de l'intensité lumineuse en sortie de fibre. Cette technique constitue la méthode la plus simple de contrôle utilisant les fibres optiques.

### 1.2.2.2. Résultats obtenus

Par ses travaux Fukuda [3] a montré la possibilité d'étudier les mécanismes d'endommagement de matériaux composites grâce aux fibres optiques.

#### Détection de fissurations

Les éprouvettes sont constituées de 12 couches de prepreg carbone (Toray T300/# 2500) de séquence  $[0^{\circ}_3/90^{\circ}_3]_6$ . Une fibre optique monomode (3M FN-SN-322) est introduite entre les plis 6 et 7. Le gainage de protection de la fibre est ôté en utilisant de l'acide sulfurique (diamètre de 125  $\mu\text{m}$ ). La fibre optique est posée perpendiculairement aux renforts.

Le montage expérimental est représenté sur la figure 1-3. La fibre optique est connectée grâce à des adaptateurs, à une source lumineuse en entrée et à une photodiode en sortie. L'éprouvette est instrumentée, outre la fibre optique, d'une jauge de fissuration collée en surface. Elle est ensuite soumise à un choc provoqué par une masse de 2,5 kg tombant à une vitesse de 2 m/s. L'impact entraîne une diminution nette de l'amplitude du signal en sortie de la photodiode (cf. fig. 1-4).

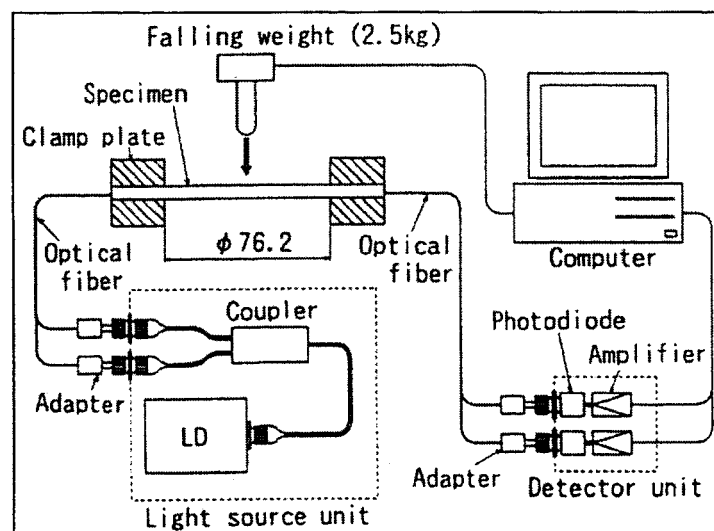
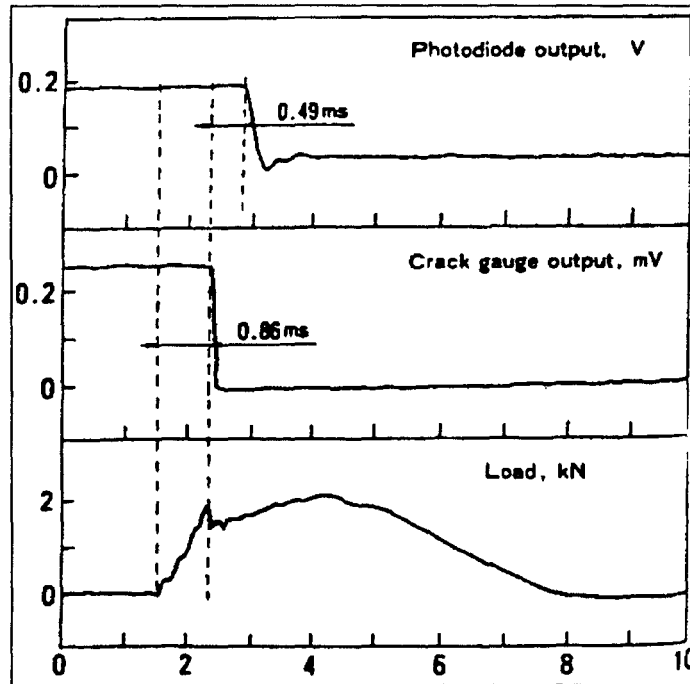


Fig. 1-3 : Montage expérimental [3]

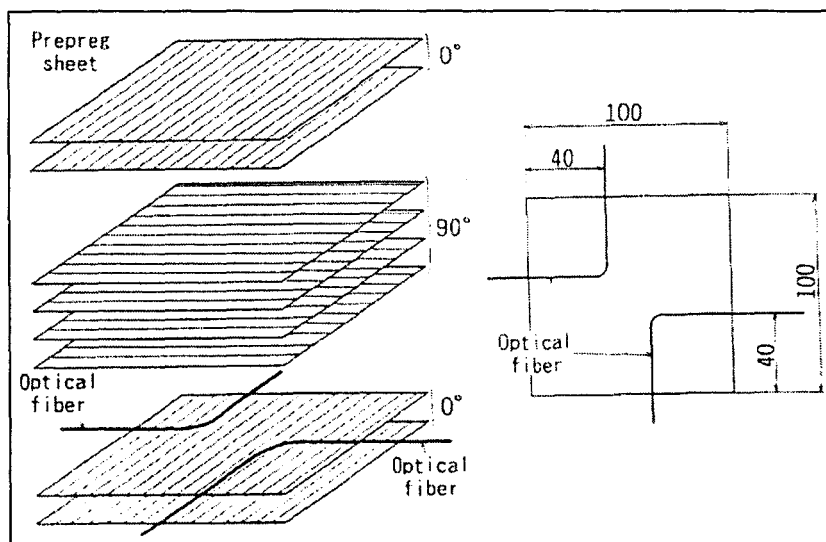
Les résultats présentés sur la figure 1-4 montrent qu'il y a un décalage de 0,49 ms entre la réponse de la jauge montée en surface et celle de la fibre optique. Cet écart correspond au temps de propagation de la fissure dans le matériau. Cette expérience met en évidence la possibilité de suivre expérimentalement la cinétique de fissuration, en intégrant plusieurs fibres optiques à différents niveaux d'épaisseur dans le matériau.



**Fig. 1-4 : Détection de fissures en fonction d'une jauge de fissuration et de l'intensité du signal d'une fibre optique [3]**

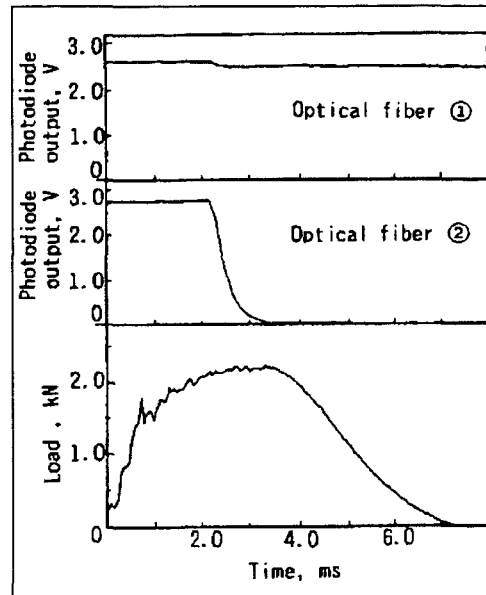
Détection de délaminages

Pour cette étude Fukuda a utilisé deux fibres optiques disposées entre deux couches de prépreg d'orientation 0° et 90° comme l'indique la figure 1-5.



**Fig. 1-5 : Echantillon pour l'essai de détection de délaminages [3]**

Le montage expérimental est similaire à celui utilisé pour la détection des fissurations. L'impact a lieu au milieu de la plaque et seule une des deux fibres optiques est fissurée (cf. fig. 1-6). Une inspection au scanner montre que la zone de délaminage n'est pas symétrique et qu'elle est beaucoup moins importante dans la zone traversée par la fibre 1, ce qui explique qu'elle ne soit pratiquement pas fissurée.



**Fig. 1-6 : Détection de délaminages utilisant deux fibres optiques [3]**

Mesures [4] quant à lui a dégagé quelques critères généraux afin d'utiliser au mieux les fibres optiques comme détecteurs d'endommagement :

- L'énergie nécessaire à la fracture des fibres optiques dépend d'une part de la structure du composite et d'autre part de l'orientation et du placement de la fibre optique par rapport aux plis.
- Le principal mécanisme de fracture des fibres optiques intégrées provient de la propagation des fissures de la matrice selon une direction perpendiculaire aux plis du matériau.
- Le maximum de sensibilité et de fiabilité des fibres optiques est par conséquent obtenu quand celles-ci sont placées entre deux plis colinéaires et orientées perpendiculairement aux fibres de renfort.
- Les fibres optiques intégrées entre deux plis non colinéaires doivent être orientées dans la direction orthogonale à la direction du pli pour lequel les fissurations de la matrice se propagent le plus facilement.
- Le maximum de sensibilité est obtenu quand les fibres optiques sont intégrées près de la surface qui subit l'impact.
- La sensibilité des fibres optiques peut être adaptée par un processus chimique de fragilisation de la fibre.

- Les fibres traitées chimiquement ne doivent pas subir des courbures importantes.
- La déformation maximale à la rupture que l'on peut obtenir avec des fibres optiques intégrées est de l'ordre de 1,4 à 1,5 % [5].
- L'endommagement causé à la fibre est irréversible [6]. C'est à dire qu'une fois le seuil de rupture de la fibre optique dépassé, même si le matériau revient après déformation à son état initial, la transmission lumineuse reste interrompue.

### 1.2.2.3. Applications

Hofer [6] a essayé de mettre en place ce type de système de détection sur des pièces industrielles de Messerschmitt-Bölkow-Blohm. Ce système peut être utilisé selon trois modes opératoires.

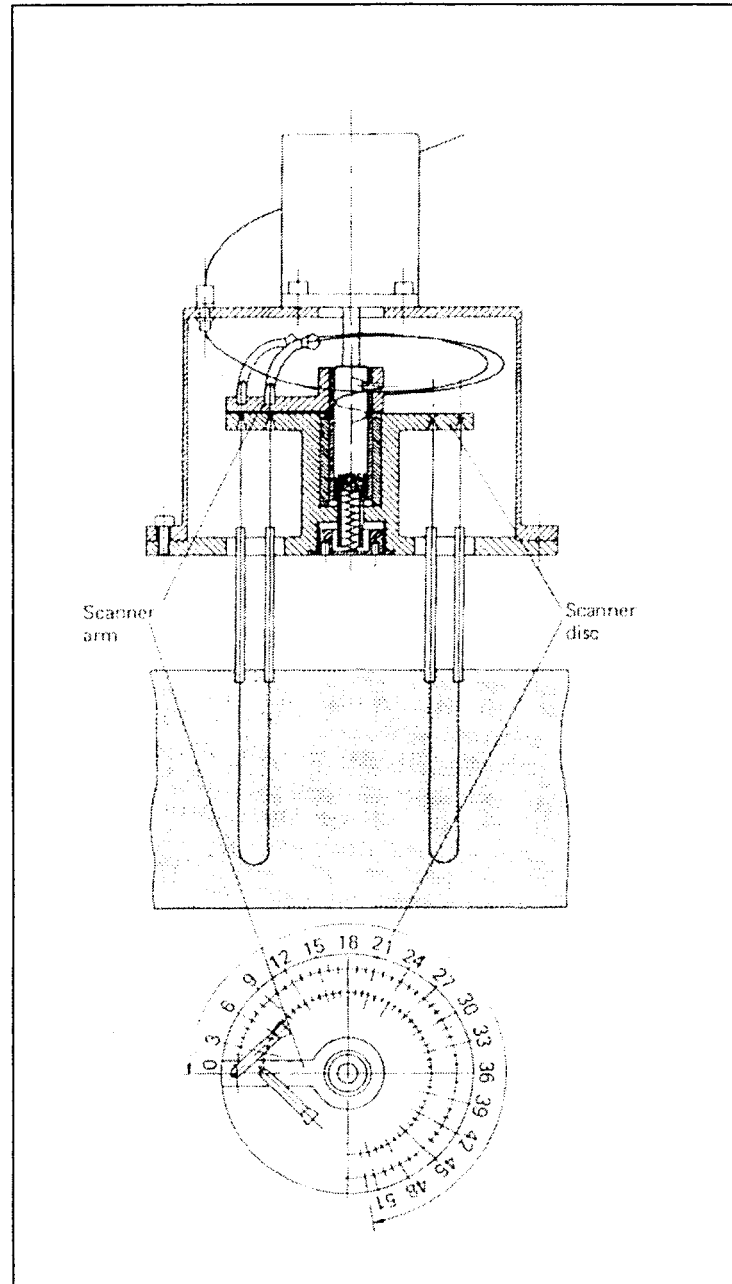
- Mode 1 : C'est un procédé de pure inspection. A l'exception des fibres optiques, aucune autre instrumentation n'est installée. La lumière est couplée manuellement aux fibres optiques et le coté opposé des fibres est observé visuellement.
- Mode 2 : C'est un contrôle en temps réel. Toutes les fibres sont connectées à une ou plusieurs sources lumineuses. A chaque sortie de fibre, un photo-détecteur est installé qui va transmettre le signal à un système électronique de contrôle.
- Mode 3 : Si de très nombreuses fibres optiques sont utilisées, il est parfois difficile et peu pratique d'équiper chaque fibre d'un photo-détecteur séparé. Dans ce cas les sorties des fibres sont branchées sur un seul détecteur et la lumière est couplée aux fibres de manière cyclique.

Les premières applications ont été mises en place sur différentes pièces aéronautiques en aluminium (Airbus) et sur des pales de rotor d'éoliennes en acier. Dans ces applications les fibres optiques sont montées en surface. Pour les matériaux composites, les procédés de fabrication permettent d'installer les fibres optiques non seulement en surface mais aussi à l'intérieur du matériau. Une des applications en cours de développement est la mise en place de fibres optiques dans une pièce de structure en fibre de verre du futur train à haute vitesse allemand. En effet la seule autre méthode d'inspection de cette pièce était la tomographie qui est très coûteuse en temps et en argent. La solution retenue est le mode 1 qui est le plus simple à mettre en place.

Cependant la majorité des applications des fibres optiques concerne l'aéronautique. La demande en gain de poids implique de plus en plus de composants en matériaux composites fibres de carbone. Or les méthodes traditionnelles d'inspection des matériaux métalliques ne peuvent s'appliquer à ces nouveaux matériaux qu'avec d'importantes restrictions. Des essais sur des pièces d'habillage externe en fibres de carbone d'avions ont été réalisés qui montrent que les fibres optiques sont capables de déterminer correctement les délaminages.

Le concept de surveillance de la structure d'un avion par un système nerveux en fibres optiques (FONS : Fibre Optic Nervous System) a été envisagé. Un modèle de laboratoire avec 50 fibres optiques d'une longueur de plus de 20 m, intégrées dans des pièces standards

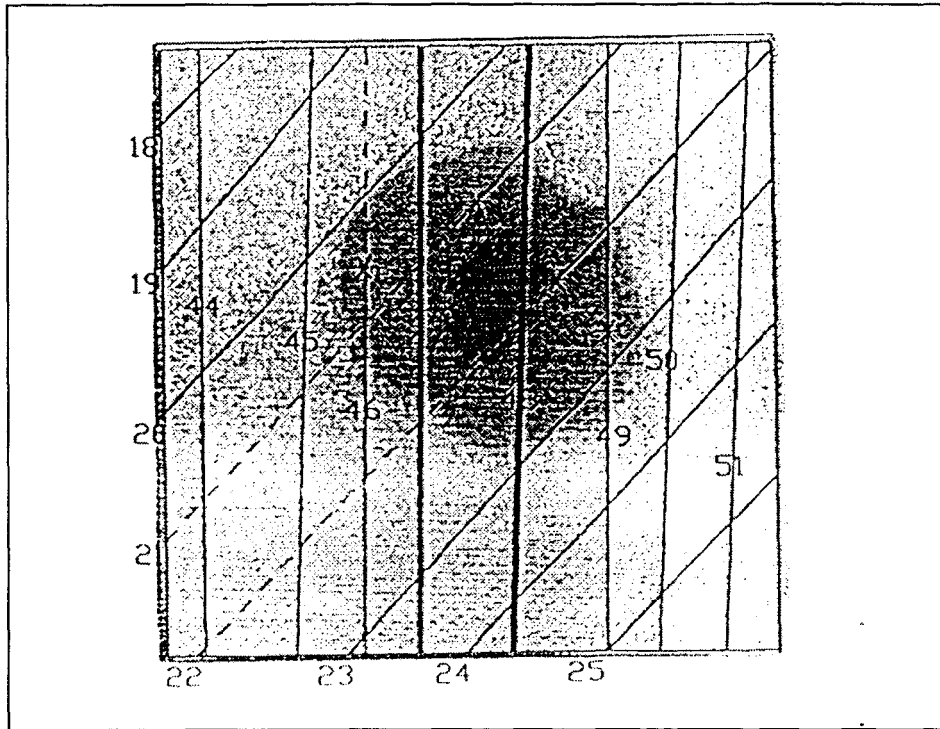
d'appareil Airbus, en fibres de carbone, est en cours de développement. Les 100 extrémités des fibres optiques sont connectées à un disque de distribution (cf. Fig 1-7). Un système mécanique avec un bras rotatif possédant une entrée reliée à une source lumineuse et une sortie connectée à un photo-détecteur permet successivement d'illuminer chaque fibre et de vérifier son intégrité.



**Fig. 1-7 : Système du disque de distribution [6]**

Measure et son équipe [7] ont mis au point avec l'assistance de Boeing-deHavilland Canada, le premier bord d'attaque d'aile d'avion contenant un système de contrôle d'endommagement par fibres optiques intégrées. Ce système comprend 250 fibres optiques noyées dans un composite aramide/époxy. Les fibres optiques sont fragilisées dans les zones sensibles par un procédé chimique. Durant le processus de fabrication de la pièce 50 % des fibres optiques ont été détruites ce qui souligne la difficulté d'intégrer des fibres optiques dans

une structure industrielle, du fait de leur fragilité. Cependant ce taux de perte pourrait être sensiblement réduit à l'avenir. Des essais d'impacts contrôlés ont été ensuite réalisés sur une partie de la pièce intacte. La figure 1-8 montre les fuites lumineuses visibles à travers le matériau et qui forment des taches sombres sur la photographie présentée. Celles-ci permettent de localiser avec précision les délaminages produits par un impact d'énergie égale à 13,5 J.



**Fig. 1-8 : Fuites lumineuses après endommagement [7]** (les lignes représentent les fibres optiques, les lignes pointillées les fibres où la transmission lumineuse est interrompue)

### 1.2.3. Mesure de déphasage

#### 1.2.3.1 Principe de mesure

La mesure de déphasage permet de remonter à la déformation du matériau. Le déphasage entre deux signaux ayant une différence de chemin optique  $L$  est donné par:

$$\Phi = \frac{2 \pi n L}{\lambda} \quad (1-1)$$

avec :

- $\Phi$  : déphasage
- $n$  : indice de réfraction du milieu
- $\lambda$  : longueur d'onde de la source



Une déformation de la fibre optique entraîne un changement de déphasage suivant l'équation suivante :

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}(n \Delta L + L \Delta n) \quad (1-2)$$

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda}(n \varepsilon L + L \Delta n) \quad (1-3)$$

avec  $\varepsilon = \Delta L/L$  (déformation)

Le premier terme représente le changement de la longueur de la fibre et le second terme le changement des propriétés optiques de la fibre dû à la déformation. D'après Butter et Hocker, ce deuxième terme serait le plus important [8]. Le changement d'indice de réfraction est donné par [9] :

$$\Delta n = -\frac{1}{2}n^3 \left[ \varepsilon (1-\mu) P_{12} - \mu \varepsilon P_{11} \right] \quad (1-4)$$

avec  $\mu$  : coefficient de Poisson  
 $P_{12}$  et  $P_{11}$  : valeurs indépendantes du tenseur de déformation optique pour le coeur de la fibre.

d'où :

$$\frac{\Delta\Phi}{\varepsilon L} = \frac{2\pi n}{\lambda} \left[ 1 - \frac{1}{2}n^2 \left[ (1-\mu) P_{12} - \mu P_{11} \right] \right] \quad (1-5)$$

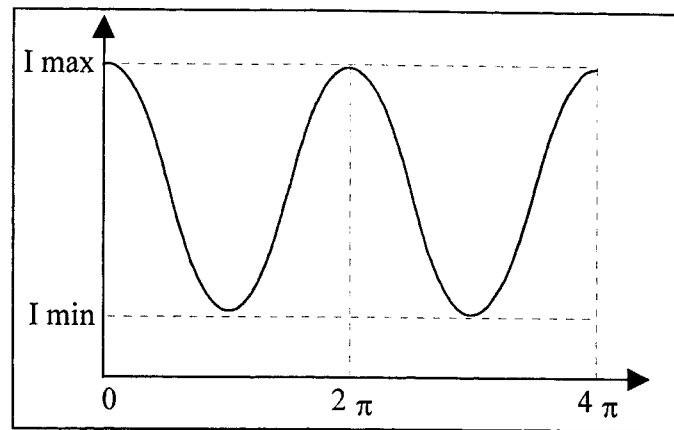
Généralement le déphasage est calculé à partir de la mesure de l'intensité résultante entre les deux ondes qui interfèrent entre elles. En effet pour deux ondes isochrones et monochromatiques d'intensité initiale  $I_1$  et  $I_2$ , l'intensité résultante est donnée par [10]:

$$I = I_1 + I_2 + 2 \left( I_1 I_2 \right)^{\frac{1}{2}} \cos \Delta\Phi \quad (1-6)$$

L'intensité oscille donc sinusoidalement entre deux valeurs extrêmes :

$$I_{\max} = \left( I_1^{\frac{1}{2}} + I_2^{\frac{1}{2}} \right)^2 \quad \text{et} \quad I_{\min} = \left( I_1^{\frac{1}{2}} - I_2^{\frac{1}{2}} \right)^2 \quad (1-7)$$

Expérimentalement, cela se traduit par des franges d'interférence brillantes et sombres, chaque frange brillante étant séparée par un déphasage de  $2\pi$  (cf. fig. 1-9).



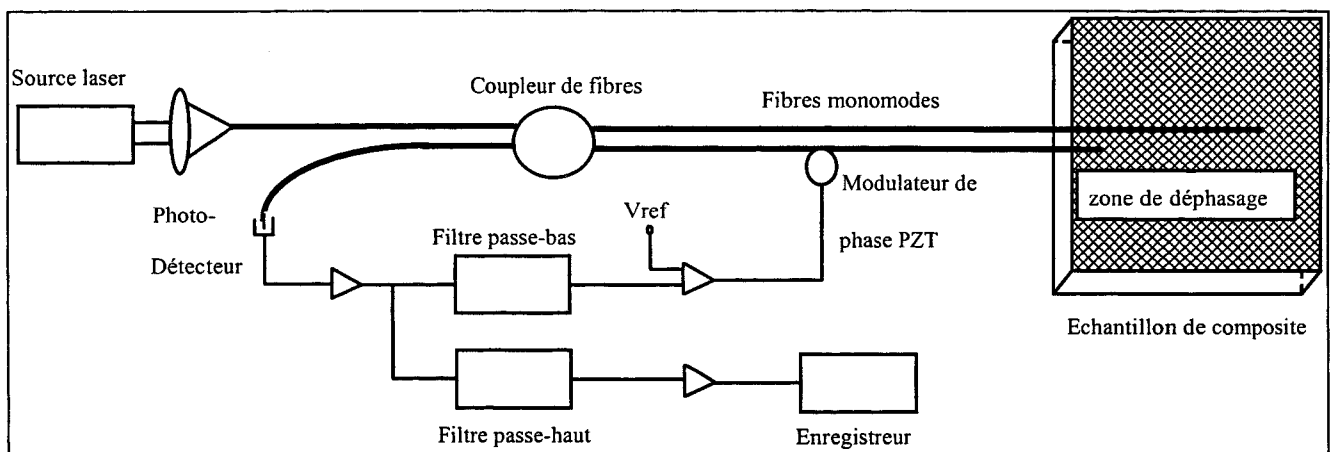
**Fig. 1-9 : Variation de l'intensité d'interférence en fonction du déphasage [10]**

Le déphasage peut être mesuré de plusieurs façons :

- mesure entre deux bras spatialement séparés d'un interféromètre
- mesure du déphasage entre deux modes se propageant dans une même fibre.

### 1.2.3.2. Interféromètre de Michelson

Cet interféromètre utilise des fibres monomode afin de conserver le front de phase. Deux fibres optiques sont couplées mécaniquement selon la même direction [11]. L'une des fibres a une longueur plus importante que l'autre. Les deux extrémités des fibres sont métallisées afin qu'il y ait réflexion des rayons lumineux (cf. Fig 1-10). Le même signal lumineux est injecté dans les deux fibres par l'intermédiaire d'un coupleur. Ce signal revient au coupleur et sort sur un photo-détecteur. Les deux signaux, provenant des deux bras de l'interféromètre donnent une figure d'interférence. Un système électronique de démodulation permet d'observer la différence de phase entre les signaux sous forme d'une réponse sinusoïdale.



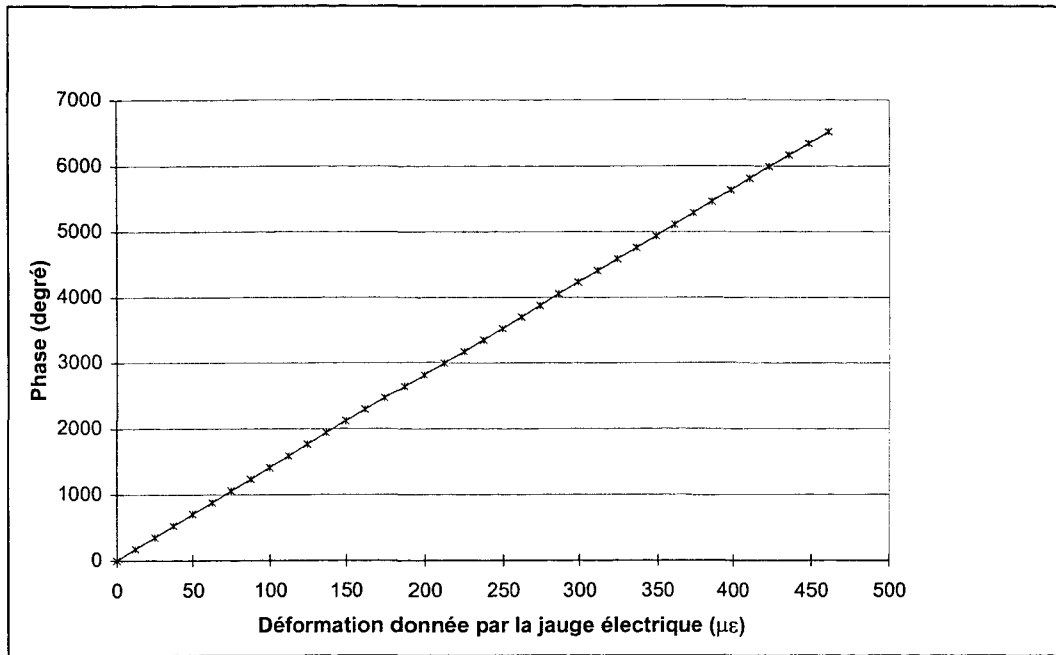
**Fig. 1-10 : Interféromètre de Michelson [12]**

Tapanes [12] a déterminé la sensibilité  $G$  d'un tel interféromètre intégré dans un composite carbone/PEEK, en mesurant simultanément le déphasage et la déformation

déterminée par une jauge électrique classique. La figure 1-11 présente les résultats obtenus. La linéarité de la mesure prouve le bon comportement de l'interface fibre optique/matériau hôte. La sensibilité mesurée est :

$$G = \frac{\Delta\Phi}{\varepsilon \ell} = 2,4 \cdot 10^7 \text{ rd/m} = 14 \text{ deg./}\mu\varepsilon \text{ cm} \quad (\text{avec } \lambda = 632,8 \text{ nm})$$

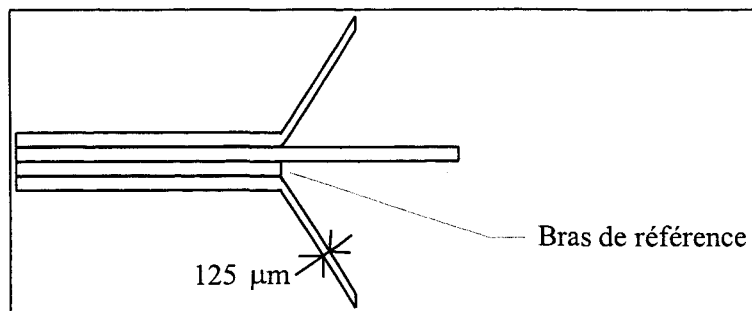
( $\ell$  correspond à la différence de longueur entre les deux bras de l'interféromètre)



**Fig. 1-11 : Courbe déphasage/déformation pour un interféromètre de Michelson [12]**

Les essais réalisés ont de plus montré que le capteur est capable de fonctionner jusqu'à une déformation de 3,2 %.

Une rosette de mesure de déformation peut aussi être réalisée suivant ce principe en utilisant plusieurs bras (cf. fig. 1-12), ce qui permet de mesurer les déformations d'un matériau suivant plusieurs directions [13].

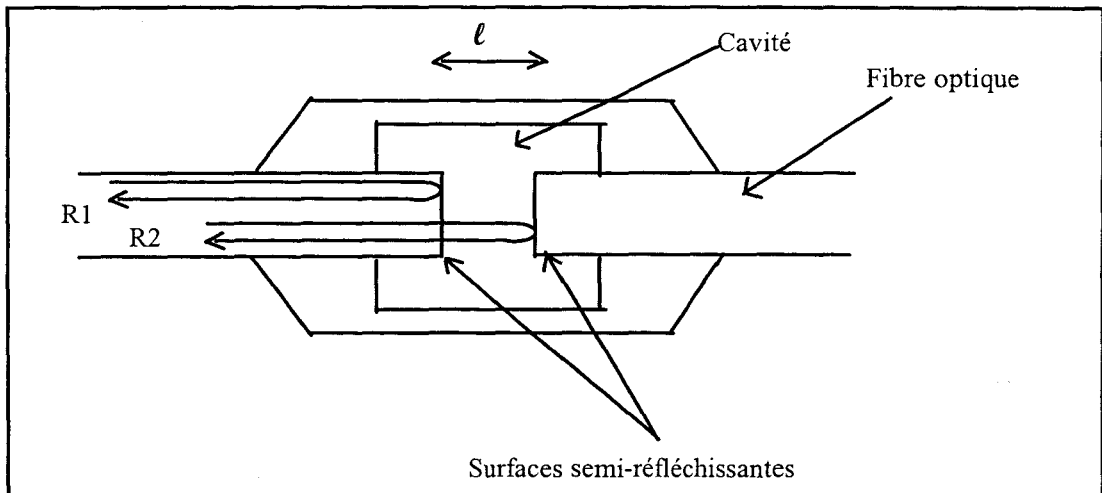


**Fig. 1-12 : Jauge composée de fibres optiques [13]**

D'autres études ont été menées afin d'utiliser un interféromètre de Michelson comme détecteur d'ondes acoustiques générées par l'endommagement du matériau [14].

### 1.2.3.3. Interféromètre de Fabry-Pérot

L'interféromètre de Fabry-Pérot a l'avantage de n'utiliser qu'une seule fibre optique comme capteur. Le principe est de couper la fibre et de réaliser sur les sections obtenues des surfaces semi-réfléchissantes par dépôt d'une couche métallique ou diélectrique (film de  $TiO_2$  [15] par exemple). L'interféromètre peut être extrinsèque (les deux surfaces réfléchissantes sont séparées par une cavité d'air) ou intrinsèque (un tronçon de fibre optique est placé entre les deux surfaces réfléchissantes). L'avantage du système extrinsèque est de supprimer les problèmes de polarisation optique à l'intérieur du capteur [16]. Comme le montre la figure 1-13, il y a deux modes  $R_1$  et  $R_2$  successivement réfléchis, pour lesquels une mesure de déphasage est effectuée en sortie.



**Fig. 1-13 : Interféromètre extrinsèque de Fabry-Pérot [17]**

Valis [18] a expérimenté un interféromètre intrinsèque de Fabry-Pérot monté à la surface d'une barre d'aluminium. En traçant la droite correspondant aux différences de déphasage en fonction de la déformation donnée par une jauge électrique, il a obtenu la sensibilité de ce détecteur :  $G = 2,24 \pm 0,07 \cdot 10^7 \text{ rad/m}$  (avec  $\lambda = 632,8 \text{ nm}$ ).

Carman [17] a quant à lui utilisé un interféromètre extrinsèque monté en surface d'un matériau composite à matrice céramique. Pour mesurer la déformation du matériau, il a négligé le deuxième terme de l'équation (1-2), ce qui donne :

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi}{\lambda} \varepsilon L \quad (1-8)$$

(L'indice de réflexion du milieu  $n$  étant égal à 1 pour une cavité d'air)

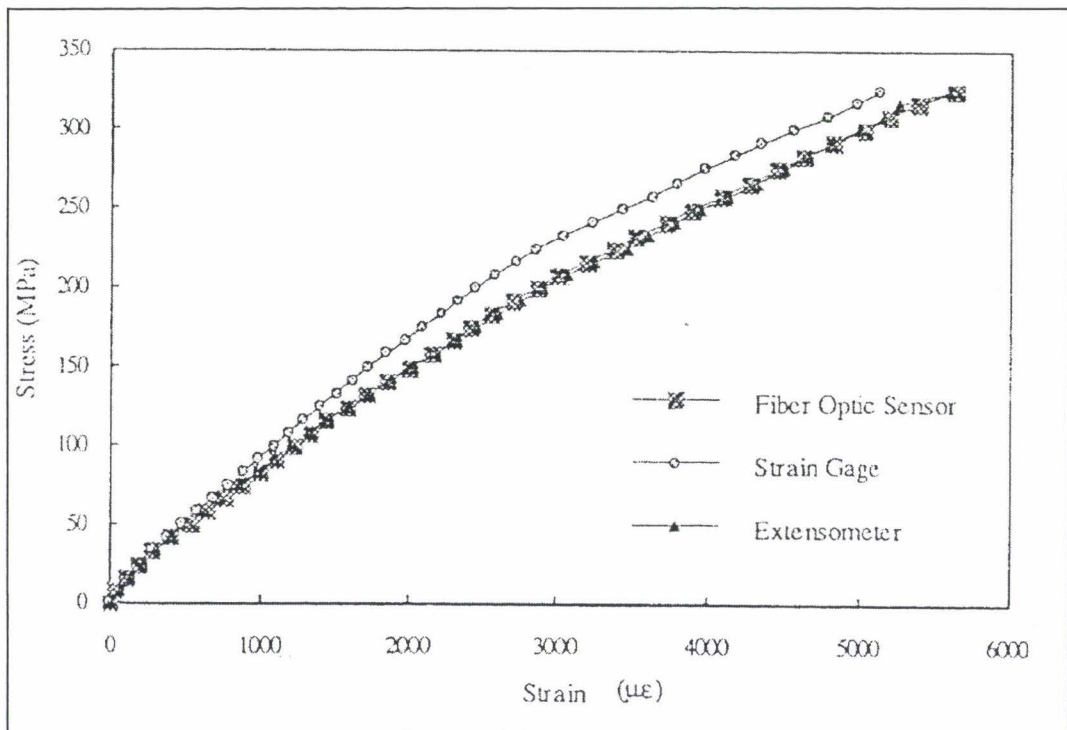
Soit  $N$  le nombre de franges obtenues sur la figure d'interférence en sortie, comme chaque frange est séparée d'un déphasage de  $2\pi$  :

$$\Delta\Phi = 2\pi N \quad (1-9)$$

d'où

$$\varepsilon = \frac{N\lambda}{L} = \frac{N(\lambda/2)}{\ell} \quad (1-10)$$

On obtient donc la déformation simplement en comptant le nombre de franges d'interférence. Carman a ensuite comparé les mesures de déformations effectuées avec ce capteur avec les méthodes classiques (jauge électrique de déformation, extensomètre), lors d'un test de traction statique. Les résultats, présentés sur la figure 1-14 montrent une bonne corrélation entre les différentes méthodes.



**Fig. 1-14 : Comparaison entre mesures de déformation en utilisant plusieurs méthodes dont un interféromètre de Fabry-Pérot [18]**

### 1.2.3.4. Fibre polarisée et fibre multimode

La mesure du déphasage se fait ici entre deux signaux simultanément injectés dans la fibre optique qui ne se propagent pas suivant le même chemin optique. Ces méthodes présentent l'avantage de ne nécessiter aucune opération particulière sur les fibres optiques.

La fibre optique polarisée se comporte comme un milieu biréfringent comportant un axe lent et un axe rapide. Une lumière linéairement polarisée est introduite dans la fibre optique avec un angle de  $45^\circ$  par rapport aux deux axes de polarisation, afin de les exciter avec une intensité égale. L'état de polarisation de la lumière en sortie de fibre est convertie en intensité en faisant interférer l'émission des deux axes dans le plan d'un analyseur de polarisation.

Le déphasage peut aussi être mesuré entre deux modes de propagation d'une fibre multimode. Vengsarkar [19] a ainsi utilisé une fibre à coeur elliptique qui permet pour une certaine gamme de longueur d'onde de ne laisser se propager le long de la fibre que deux modes avec une intensité stable [20]. En réalisant un capteur à fibres optiques bimodales polarisées, il a obtenu une sensibilité de  $\pm 10 \mu\text{m/m}$ .

Measure [4] note une sensibilité de  $0,065 \text{ deg}/\mu\epsilon \text{ cm}$  pour des fibres hautement biréfringentes York VOSP HB600, soit une sensibilité inférieure de deux ordres de grandeur par rapport à l'interféromètre de Michelson.

### 1.2.4. Mesure de longueur d'onde : réseau de Bragg

Un réseau de Bragg est obtenu en exposant le coeur d'une fibre optique photosensible (par exemple en germanosilicate) à deux rayons lasers U.V. de haute intensité se recouvrant [21]. Les deux rayons produisent un réseau d'interférence à l'intérieur de la fibre optique, dans un plan normal à l'axe de la fibre. Cette exposition provoque une migration des dopants et forme une région partiellement réfléchive pour des longueurs d'ondes spécifiques. Cette méthode holographique transverse entraîne une modulation périodique de l'indice de réfraction le long d'une partie de la fibre optique. La longueur d'onde pour laquelle la réflexion est la plus importante est directement reliée à la période  $\Lambda$  de la figure d'interférence créée, suivant la condition de Bragg :

$$\lambda_0 = 2 n \Lambda \quad (1-11)$$

Si une lumière à large bande spectrale est envoyée dans la fibre, on observe alors un pic étroit centré sur la longueur d'onde  $\lambda_0$  dans le spectre de réflexion et inversement un trou dans le spectre de transmission pour cette même longueur d'onde.

A partir de la condition de Bragg, la déformation de la fibre optique peut être directement reliée à la longueur d'onde de Bragg. En effet, en dérivant l'équation (1-11) et en considérant que la fibre est soumise seulement à une déformation longitudinale  $\epsilon$ , la différence de la longueur d'onde de Bragg est donnée par :

$$\delta\lambda_0 = \lambda_0 \left[ \frac{\delta n}{n} + \frac{\delta\Lambda}{\Lambda} \right] \quad (1-12)$$

où  $\frac{\delta\Lambda}{\Lambda}$  correspond à la déformation et où l'action de la température est négligée, soit encore :

$$\delta\lambda_0 = \lambda_0 \left[ \frac{\delta n}{n} + \varepsilon \right] \quad (1-13)$$

En utilisant l'équation (1-4)

$$\delta\lambda_0 = \lambda_0 \left\{ \left[ 1 - \left( n^2 / 2 \right) \left[ P_{12} - \nu \left( P_{11} + P_{12} \right) \right] \right] \right\} \varepsilon = \alpha \lambda_0 \varepsilon \quad (1-14)$$

avec  $\nu$  : coefficient de Poisson du coeur de la fibre optique  
 $P_{11}$  et  $P_{12}$  : valeurs indépendantes du tenseur de déformation optique pour le coeur de la fibre

A partir de la variation de la longueur d'onde de Bragg, on retrouve donc la déformation du matériau.

Morey [22] a calculé le facteur de proportionnalité  $\alpha$  entre la variation de la longueur d'onde de Bragg et la déformation de la fibre optique à partir des valeurs des coefficients photoélastiques de la fibre (pris pour de la silice pure) :  $\alpha = 0,78$ . Il en a déduit ensuite la sensibilité du capteur réalisé qui est de  $0,046 \mu\text{m/m}$ , en considérant les limites de mesure du système optique de détection des longueurs d'onde (monochromateur).

Il a ensuite mesuré expérimentalement la sensibilité longitudinale à la déformation d'une fibre optique de germanosilicate muni d'un réseau de Bragg. ( $\lambda_0 = 576,2 \text{ nm}$ ) par l'application d'une charge en traction à l'aide d'un ressort calibré. La réponse du capteur est pratiquement linéaire, cependant la sensibilité expérimentale est plus importante de 17 % par rapport à la sensibilité calculée, ce qui provient des incertitudes sur les valeurs des coefficients photoélastiques de la fibre.

Simonsen [23] a introduit des fibres optiques munies de réseaux de Bragg à l'intérieur d'éprouvettes en composite verre/polyester. Les éprouvettes sont soumises à des essais de flexion trois points (la distance entre appuis est de 250 mm) pour valider le capteur intégré. Le dispositif expérimental est présenté sur la figure 1-15. La lumière blanche d'une lampe au xénon est injectée dans la fibre optique intégrée dans l'éprouvette. La fibre optique utilisée possède deux réseaux de Bragg ( $\lambda_0 = 825 \text{ nm}$ ) : l'un situé à l'intérieur de l'éprouvette et l'autre situé à l'extérieur qui sert de référence. Le spectre transmis est mesuré en sortie de la fibre optique par un monochromateur. Une jauge de déformation classique est placée en surface de l'éprouvette.

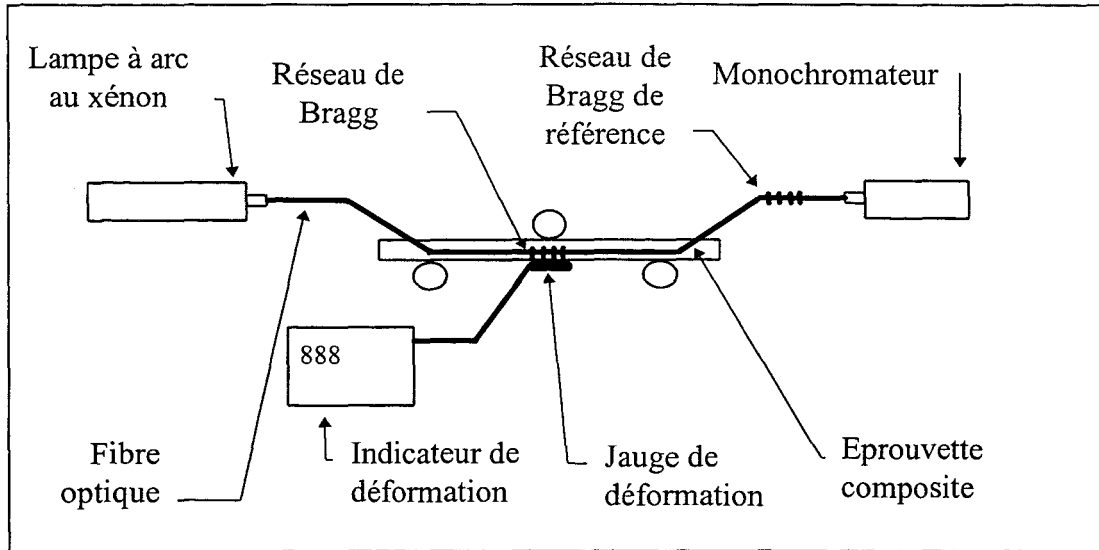


Fig. 1-15 : dispositif expérimental [23]

Lorsque le réseau de Bragg est exposé à des déformations importantes deux trous apparaissent dans le spectre de transmission (cf. fig. 1-16). La présence de deux longueurs d'ondes serait due au chargement de flexion qui ne correspond pas à une sollicitation absolument pure pour la fibre optique. Ces conditions de chargement provoquent une biréfringence dans la fibre qui se traduit par l'apparition de deux longueurs d'onde de Bragg  $\lambda_1$  et  $\lambda_u$ .

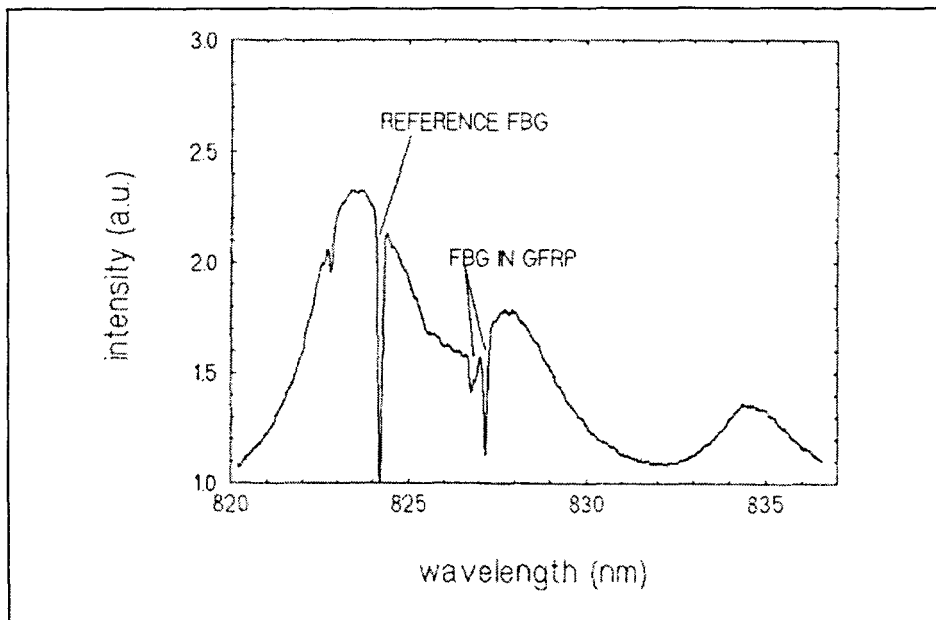
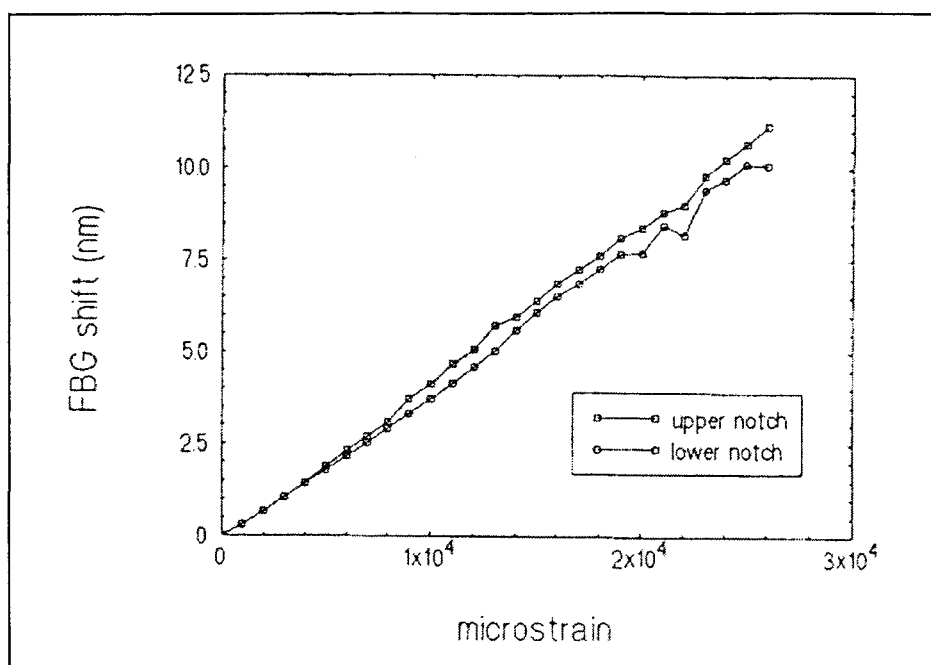


Fig. 1-16 : Spectre optique de transmission pour une déformation de 5000  $\mu\epsilon$  pour la jauge de déformation [23]





**Fig. 1-17 : Déplacement de la longueur d'onde de Bragg en fonction de la déformation de la jauge de surface pour un essai de flexion trois points [23]**

La figure 1-17 présente les résultats pour un essai en flexion trois points. Le décalage de la longueur d'onde de Bragg est quasiment linéaire avec la déformation mesurée par la jauge de surface :

$$\delta\lambda_b = \alpha' \varepsilon + \beta \quad (1-15)$$

La fibre optique est placée à 62 % du plan neutre de l'éprouvette, ce qui signifie qu'une déformation de la jauge de surface de 1000  $\mu\varepsilon$  correspond à une déformation de la fibre optique de 620  $\mu\varepsilon$ . Le coefficient  $\alpha'$  moyen pour quatre éprouvettes est de 0,65 nm/1000  $\mu\varepsilon$  en considérant la déformation de la fibre optique. La déformation maximale avant destruction du capteur est 16000  $\mu\varepsilon$  au niveau de la fibre optique (26000  $\mu\varepsilon$  en peau d'éprouvette). Des cycles de chargement, déchargement (jusqu'à 12 cycles) montrent que le coefficient  $\alpha'$  reste identique et qu'il n'y a pas de phénomène d'hystérésis. Le coefficient  $\beta$  très faible (0,01 nm) est probablement dû aux effets de la température.

L'avantage du réseau de Bragg sur les interféromètres est que sa fabrication ne nécessite pas de coupure ou de raccordement de la fibre optique comme pour les interféromètres, ce qui permet une réalisation moins délicate du capteur. De plus plusieurs réseaux de Bragg peuvent être réalisés sur la même fibre optique. Les différents réseaux peuvent avoir des longueurs d'onde de Bragg différentes, obtenues en changeant la longueur d'onde des radiations U.V. auxquelles la fibre optique est exposée. Une déformation de 20000  $\mu\varepsilon$  entraîne un décalage de longueur d'onde de 10 nm [22]. Les diodes laser utilisées pour réaliser les réseaux de Bragg peuvent avoir des longueurs d'onde variant sur une gamme de 50 nm. Il est donc possible de réaliser 4 ou 5 capteurs de déformation sur la même fibre utilisant la même source d'entrée et le même système de traitement du signal en sortie.

## 1.2.5. Problèmes rencontrés avec les capteurs à fibres optiques

### 1.2.5.1. Problèmes liés aux interféromètres

Le premier problème est celui de l'influence de la température. En effet, le déphasage entre les signaux injectés dans les fibres optiques dépend non seulement de la déformation du matériau mais aussi des variations de température suivant l'équation suivante [19] :

$$\Delta\Phi = \left[ \beta \frac{\partial L}{\partial T} + L \frac{\partial \beta}{\partial T} \right] \Delta T + \left[ \beta \frac{\partial L}{\partial \varepsilon} + L \frac{\partial \beta}{\partial \varepsilon} \right] \Delta \varepsilon \quad (1-16)$$

avec 
$$\beta = \frac{2\pi n}{\lambda}$$

Pour lever l'ambiguïté entre la variation de température et la déformation, plusieurs techniques ont été proposées : l'utilisation d'un interféromètre de Fabry-Pérot fonctionnant avec des fibres polarisées [24], ou l'emploi de fibres bimodales biréfringentes [19] permettant de déterminer simultanément le déphasage entre les deux modes de propagation et les deux modes de polarisation de la fibre. Ces procédés permettent d'obtenir deux mesures de déphasage qui conduisent à un système de deux équations à deux inconnues qui peut être résolu :

$$\begin{bmatrix} \Delta\Phi_1 \\ \Delta\Phi_2 \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} \quad (1-17)$$

Le second problème est relatif à l'initialisation des mesures. En effet, les réponses en sortie des capteurs interférométriques sont basées sur des mesures de déphasage sinusoïdales comportant un grand nombre de périodes. Si le système est arrêté, le déphasage de référence est perdu et les informations obtenues quand l'on redémarre le système ne peuvent plus être quantifiées [16, 25]. Il est donc impossible d'effectuer des mesures ponctuelles avec les systèmes interférométriques.

### 1.2.5.2. Problèmes d'intégration de la fibre optique dans le matériau

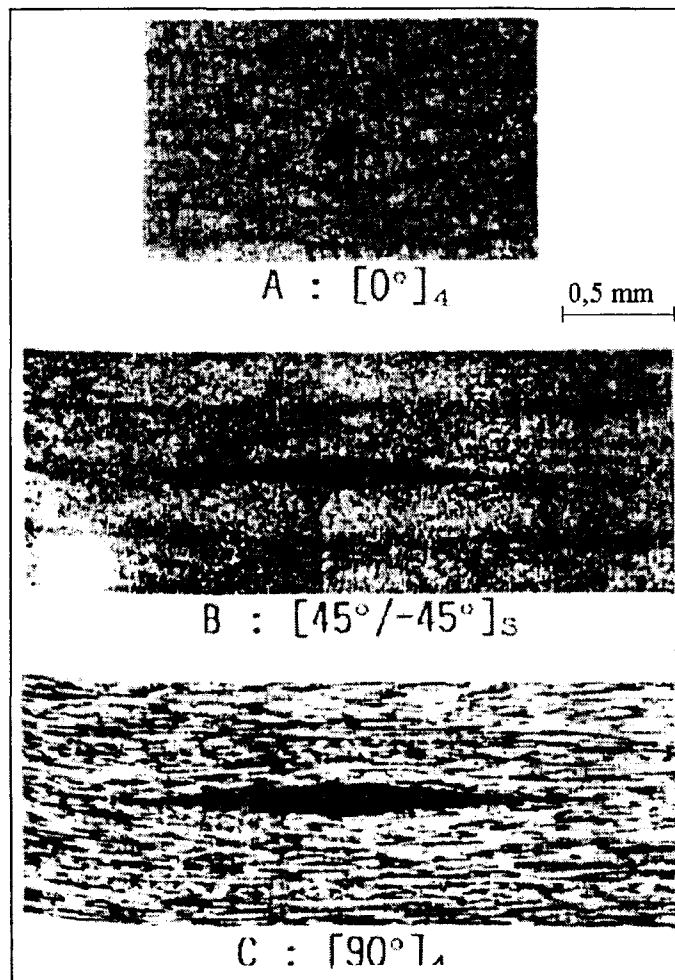
Une règle fondamentale dans le choix d'un capteur intégré est de ne pas dégrader les propriétés mécaniques du matériau hôte. Or l'introduction de fibres optiques s'accompagne de modifications locales des propriétés mécaniques du composite. Les fibres optiques ont en effet un diamètre de 100  $\mu\text{m}$  à 300  $\mu\text{m}$  qui est toujours supérieur au diamètre des fibres de renforcement qui est de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ . Aussi, il y a une rupture inévitable des fibres de renfort au voisinage immédiat du capteur [26].

Les perturbations mécaniques dépendent non seulement du diamètre de la fibre (elles augmentent avec celui-ci [27]), mais aussi de l'orientation relative de la fibre optique par

rapport aux fibres de renfort. Un angle important entre la fibre optique et les fibres de renfort provoque une déformation locale des fibres de renfort et la formation d'un agglomérat de résine autour du capteur, visible sur la figure 1-18 dans le cas d'un composite carbone/époxy.

Des mesures de concentration de contrainte effectuées par interférométrie de Moiré [28] ont mis en évidence que les fibres optiques placées parallèlement aux fibres de renfort permettaient de limiter les perturbations locales. Cette étude montre qu'une fibre optique placée perpendiculairement aux fibres de renfort engendre une concentration de contrainte dans la direction des fibres de renfort très importante qui peut être à l'origine d'un délaminage. Cependant, même pour une fibre optique placée parallèlement, une altération de la résistance en fatigue du matériau est à craindre.

Pour les mesures par interruption de la transmission lumineuse, il est donc impératif de trouver un compromis entre la position du capteur à  $90^\circ$  des fibres de renfort qui donne la meilleure sensibilité et la position parallèle aux fibres qui permet une intégration optimale du capteur. D'autre part la qualité de l'interface fibre optique/matrice du composite intervient aussi dans l'intégration de la fibre optique. Il faut donc vérifier la comptabilité chimique de la couche externe de la fibre optique avec la matrice et éventuellement enrober la fibre optique d'un gainage spécifique [29].



**Fig. 1-18 : Perturbations générées par la présence d'une fibre optique orientée à  $0^\circ$  dans un composite carbone/époxy présentant des plis à  $0^\circ$  (A),  $\pm 45^\circ$  (B) ou  $90^\circ$  (C) [3]**

## 1.3. Matériaux électrocéramiques

### 1.3.1. Principe et définitions

Les matériaux électrocéramiques sont capables de se contracter ou de s'allonger sous l'effet d'un champ électrique externe et inversement une déformation d'un tel matériau entraîne la création d'un champ électrique [30]. C'est ce dernier effet qui permet d'utiliser les électrocéramiques pour contrôler la déformation et l'endommagement des matériaux composites. A la différence des capteurs optiques, les capteurs électrocéramiques n'ont donc pas besoin a priori de signaux extérieurs en entrée.

Cette propriété est due à la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique par réorientation des dipôles électriques, ce qui entraîne une déformation du réseau cristallin du matériau. Pour décrire les interactions électromécaniques d'une électrocéramique, l'équation couramment utilisée est la suivante (la convention d'écriture d'Einstein étant utilisée) [31] :

$$x_{ij} = s_{ijkl} X_{kl} + d_{mij} E_m + g_{mnij} E_m E_n \quad (1-18)$$

où

$x_{ij}$ :	déformation élastique induite
$X_{kl}$ :	contrainte élastique imposée
$E_m, E_n$ :	composants du champ électrique appliqué
$s_{ijkl}$ :	tenseur de complaisance élastique
$d_{mij}$ :	tenseur de piézo-électricité
$g_{mnij}$ :	tenseur d'électrostriction

Cette équation, obtenue par dérivation de l'équation élastique de Gibb par la contrainte, met en évidence deux termes faisant intervenir le champ électrique.

Le premier terme correspond à l'effet piézo-électrique :

$$x_{ij} = d_{mij} E_m \quad (1-19)$$

La déformation est proportionnelle au champ électrique et le sens de la déformation dépend de signe du courant électrique appliqué [32]. L'effet piézo-électrique est possible uniquement dans un cristal ayant le degré de symétrie requis.

Le deuxième terme correspond à l'effet d'électrostriction :

$$x_{ij} = g_{mnij} E_m E_n \quad (1-20)$$

La déformation est proportionnelle au carré du champ électrique; le sens de déformation est donc indépendant du signe du champ appliqué. L'effet d'électrostriction est présent dans tous les matériaux diélectriques, mais il est généralement très faible et dominé

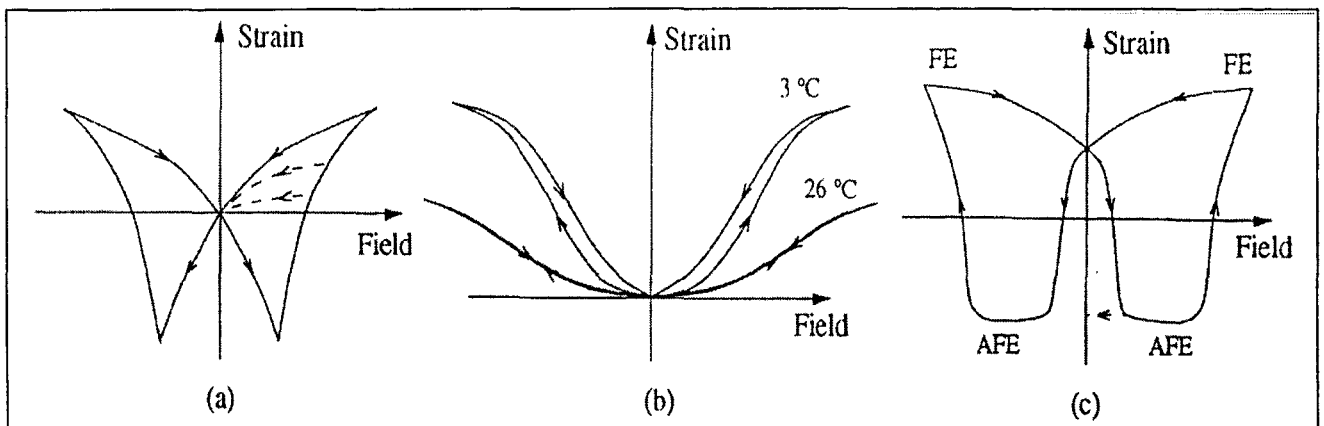
par l'effet piézo-électrique. L'effet d'électrostriction est assez important pour permettre un couplage électromécanique non négligeable, seulement pour des matériaux ayant une très haute constante diélectrique.

Ces matériaux électrostrictifs encore appelés matériaux ferroélectriques ne possèdent leurs propriétés d'électrostriction que pour une température  $T$  inférieure à  $T_c$  nommée température de Curie. Dans le cas des niobates de plomb et de magnésium PMN, qui sont des matériaux purement électrostrictifs, le réseau cristallin a une structure cubique  $m\bar{3}m$ . Le tenseur d'électrostriction n'a alors plus que trois termes indépendants. L'équation (1-20) se réécrit sous la forme [32] :

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{12} & 0 & 0 & 0 \\ m_{12} & m_{11} & m_{12} & 0 & 0 & 0 \\ m_{12} & m_{12} & m_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & m_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & m_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^2 \\ E_2^2 \\ E_3^2 \\ E_2 E_3 \\ E_3 E_1 \\ E_1 E_2 \end{bmatrix} \quad (1-21)$$

avec :  $x_1, x_2, x_3$  : déformations axiales  
 $x_4, x_5, x_6$  : déformations de cisaillement

En réalité les phénomènes sont généralement plus complexes que ceux décrit par l'équation (1-18). La relation entre le champ électrique et la déformation pour les matériaux considérés est souvent hautement non linéaire. De plus les tenseurs de piézo-électricité et d'électrostriction dépendent du champ appliqué et de la température [31]. Cela engendre des phénomènes d'hystérésis comme le montre la figure 1-19 qui présente les courbes caractéristiques obtenues pour différents types d'électrocéramiques.



**Fig. 1-19 : Courbes de déformation en fonction du champ électrique pour trois types d'électrocéramiques [33] :**  
 (a) piézo-électriques, (b) électrostrictifs, (c) céramiques à mémoire de forme.

### 1.3.2. Capteurs électrocéramiques classiques

Ces capteurs sont composés d'une structure céramique multi-couches dont les différentes couches sont connectées mécaniquement en série et électriquement en parallèle. Les alliages céramiques les plus utilisés sont les zirconates titanates de plomb PZT et les niobates de plomb et de magnésium PMN. Ces derniers possèdent comme avantage de présenter un hystérésis négligeable [31].

Le champ électrique peut être appliqué par des électrodes lamellaires, collées sur la céramique et réalisées par circuits imprimés (cf. fig. 1-20).

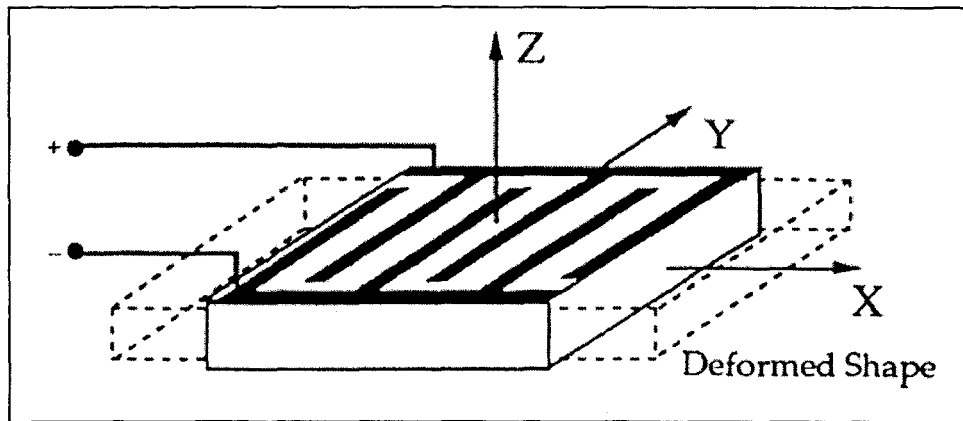


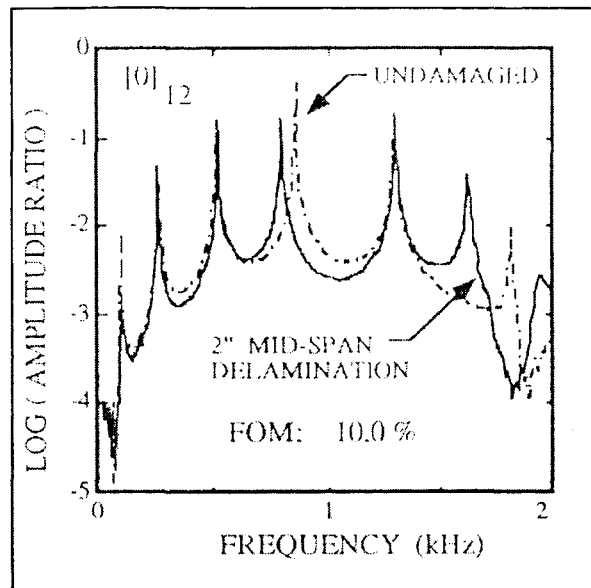
Fig. 1-20 : Electrodes d'une piézo-céramique [34]

La déformation est cependant limitée autour de 0,1 % pour les PMN [35] et jusqu'à 0,8 % pour une céramique zirconate, titanate, sianate de plomb PZSnT [31]. De plus l'épaisseur de tels capteurs est importante : 2 mm à 0,2 mm [35], ce qui limite fortement leur intégration à l'intérieur d'un matériau composite.

Des essais de mise en évidence de délaminages par des capteurs PZT montés à la surface d'un composite ont été effectués par Keilers [36]. Deux électrocéramiques sont placées sur un barreau de composite carbone/époxy. L'une joue le rôle d'actionneur (tension d'entrée  $F_a$ ) et l'autre de capteur (tension de sortie  $F_s$ ). Le signal analysé est le gain  $G$  en fonction de la fréquence utilisée :

$$G_i = \frac{\Phi^s(\omega_i)}{\Phi^a(\omega_i)} \quad (1-22)$$

L'expérience a été réalisée en parallèle sur un échantillon non endommagé et sur un échantillon comportant un délaminage artificiel provoqué par l'introduction entre deux plis d'un morceau de PTFE de 5,08 cm (2 pouces). On note des différences entre les signaux obtenus pour les deux échantillons surtout vers les hautes fréquences (cf. fig. 1-21). Un modèle de calcul a été développé afin de pouvoir retrouver d'après la réponse du système, la surface des délaminages occasionnés.



**Fig. 1-21 : Réponse des capteurs piézo-électriques pour un échantillon endommagé et un échantillon non endommagé de composite carbone/époxy [36]**

Les électrocéramiques peuvent être aussi utilisées comme actionneurs afin de réduire les déformations d'un matériau, engendrées par exemple par des contraintes thermiques [37].

### 1.3.3. Films et fibres piézo-électriques

De nouveaux capteurs électrocéramiques ont été mis au point, notamment sous forme de films ou de fibres.

#### 1.3.3.1. Films

Des films de polyfluorure de vinylidène PVDF peuvent servir de capteurs de déformation [38]. Leur épaisseur est seulement de 28  $\mu\text{m}$ . Ce film est recouvert sur ses deux faces d'une couche conductrice métallique de NiCr ou NiCu, déposée sous vide, qui sert d'électrode. Des mesures effectuées avec ce type de capteur, lors de détection d'endommagements créés par impacts sur des composites carbone/époxy, montrent une diminution de 10 % de la tension en sortie du capteur lors d'un accroissement de 27 % de la surface délaminiée [39]. Cependant les courbes obtenues sont loin d'être linéaires et monotones.

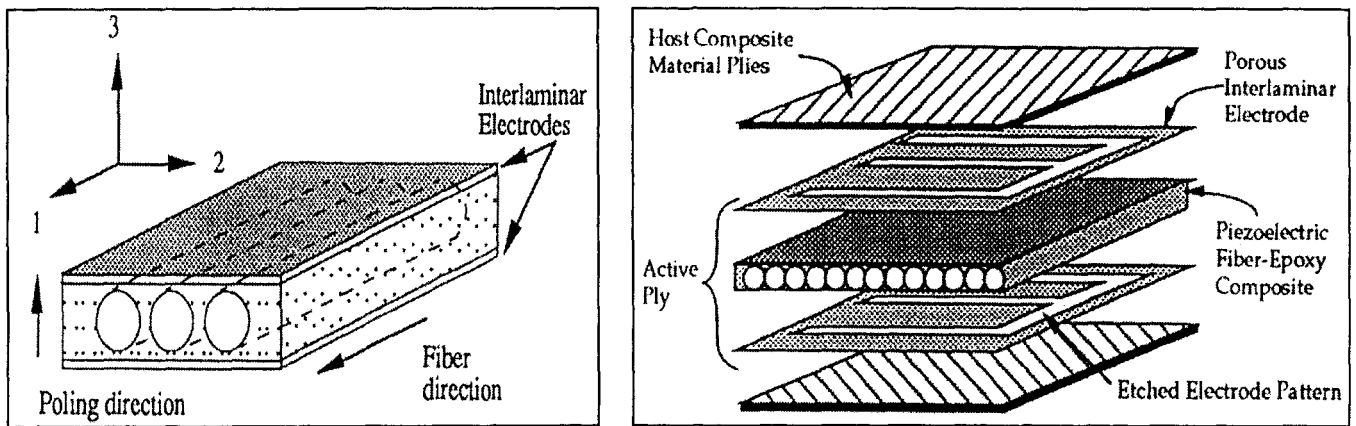
Des films de PZT d'épaisseur de 0,16 à 0,55  $\mu\text{m}$  ont été caractérisés. Ils présentent des propriétés intéressantes comme une courbe déformation en fonction du champ électrique linéaire et une déformation maximale de plus de 0,1 % [31].

### 1.3.3.2. Fibres piézo-électriques

Des capteurs utilisant des fibres piézo-électriques ont été réalisés suivant plusieurs méthodes :

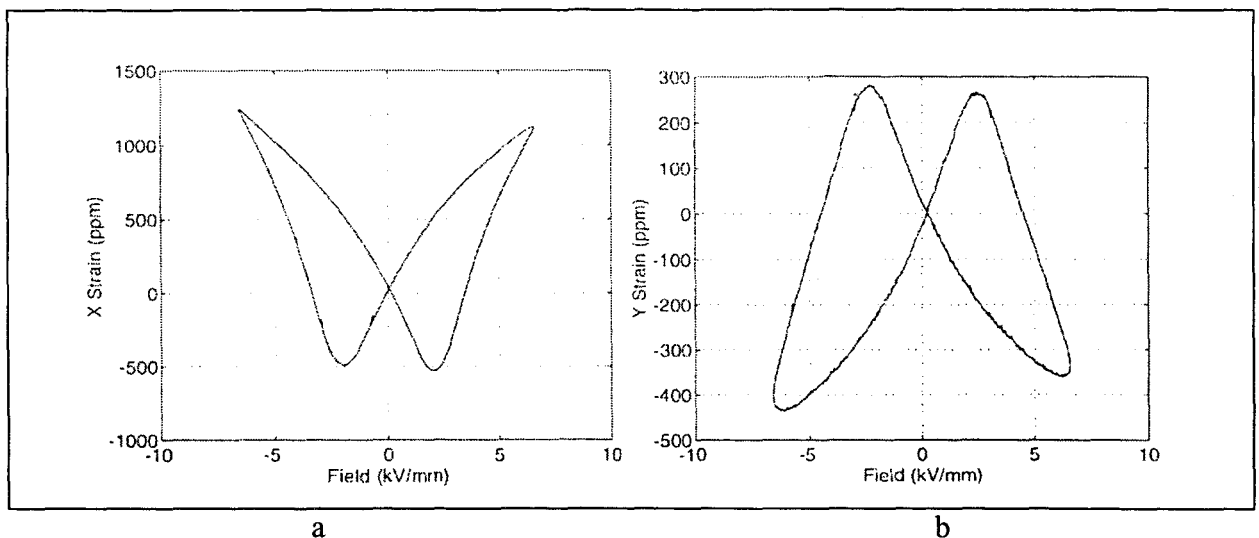
- réalisation d'une couche active
- dépôt piézo-électrique sur fibres de carbone.

La première technique consiste à fabriquer un capteur-actionneur avec des fibres piézo-électriques noyées dans une matrice époxy et encadrées par deux électrodes en peigne [40] (cf. fig. 1-22).



**Fig. 1-22 : Mise en oeuvre d'actionneurs composites : matrice époxy/fibres piézo-électriques [33]**

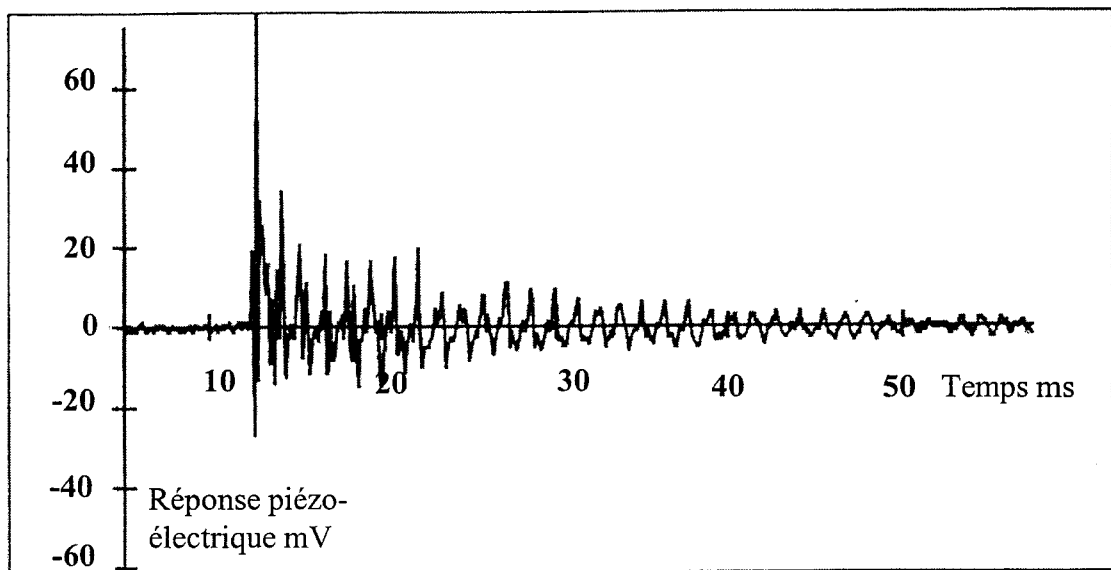
Les fibres piézo-électriques ont un diamètre de 130  $\mu\text{m}$  et les électrodes 12  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. La taille de ce capteur correspond donc à celle des capteurs à fibres optiques. Les courbes de déformation en fonction du champ électrique sont présentées sur la figure 1-23. Le maximum de déformation est de 0,17 % le long de l'axe de la fibre et de - 0,06 % dans la direction transverse, pour un champ de  $\pm 6,6 \text{ Kv/mm}$ .



**Fig. 1-23 : Courbes de comportement de fibres piézo-électriques; (a) sens fibres; (b) sens transverse aux fibres [40]**



La seconde technique a été développée par Shaikh [41]. Il s'agit de recouvrir d'une couche piézo-électrique d'oxyde de zinc des fibres de carbone, grâce à la méthode de déposition par laser pulsé. L'épaisseur de la couche réalisée est de 1  $\mu\text{m}$ . Les fibres synthétisées sont ensuite intégrées dans un barreau en composite carbone/époxy. Les fibres de carbone piézo-électriques jouent le rôle d'une électrode alors que les fibres non traitées du composite jouent le rôle de la deuxième électrode. Il suffit simplement de connecter ces électrodes à un oscilloscope digital pour obtenir un signal. Le matériau a ensuite été soumis à des vibrations contrôlées, ce qui entraîne une réponse sinusoïdale du capteur pratiquement identique à celle d'un accéléromètre témoin monté sur l'échantillon. L'endommagement de l'échantillon a ensuite été provoqué par un tir de billes de plomb sur ce dernier. L'apparition de délaminages et de ruptures dans le matériau provoque une réponse du capteur (cf. fig. 1-24) qui peut être comparée aux signaux obtenus en émission acoustique.



**Fig. 1-24 : Emission du capteur piézo-électrique lors de la fracture d'un composite carbone/époxy [41]**

## 1.4. Fibres de carbone

### 1.4.1. Principe : utilisation des propriétés électriques des fibres de carbone

Les fibres de carbone ont été initialement développées pour faire office de fibres de renfort dans les matériaux composites, du fait de leurs bonnes propriétés mécaniques. Elles présentent de plus une bonne conductivité électrique de l'ordre de  $\gamma = 5 \cdot 10^4 \Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ . Il paraît donc intéressant de corrélérer l'évolution de la résistance électrique de ces fibres avec l'évolution de l'endommagement du matériau. En effet, si l'on fait circuler un courant électrique le long des fibres de carbone, la rupture des fibres entraîne la diminution de la section de passage du courant et par conséquent une augmentation de la résistance électrique, d'après la relation suivante :

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1-23)$$

avec

- R : résistance électrique ( $\Omega$ )
- $\rho$  : résistivité ( $\Omega \cdot m$ )
- L : longueur d'une fibre (m)
- S : section de la fibre ( $m^2$ )

La mesure peut alors se faire :

- soit directement aux bornes des fibres de carbone. L'équation précédente est alors directement applicable.
- soit entre deux points quelconques du matériau à contrôler. Le courant mesuré dépend dans ce cas des chemins électriques existant entre les différentes fibres de carbone.

Pour un tel système, il est possible d'augmenter la sensibilité du capteur en dopant ioniquement les fibres de carbone [42].

Il faut noter également que les fibres de carbone possèdent aussi une bonne conductibilité thermique, les amenant par exemple à être utilisées comme système de dégivrage dans l'aéronautique [43], ce qui peut constituer un atout supplémentaire pour certaines applications.

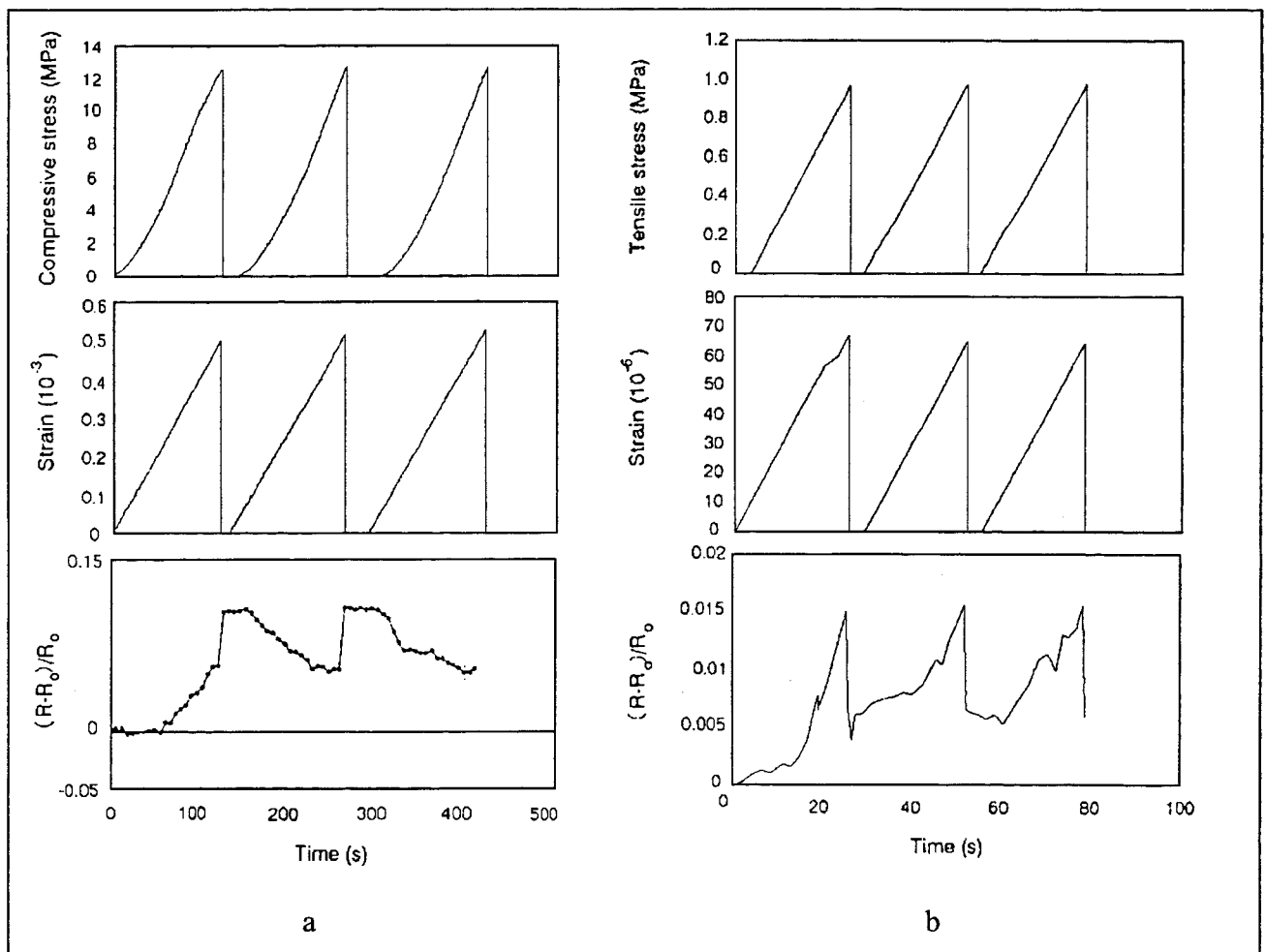
En pratique, le suivi de la résistance électrique des fibres de carbone a rarement été utilisé, à notre connaissance, comme technique de suivi d'endommagement d'un matériau ou d'une structure hôte. Les résultats actuellement disponibles dans la littérature scientifique et technique concernent :

- l'utilisation de fibres de carbone coupées noyées dans un matériau hôte
- l'utilisation des fibres de renfort continues d'un composite carbone/résine
- l'application de la méthode à des composites verre/résine.

## 1.4.2. Utilisation de fibres coupées

Chen [44] a utilisé des fibres de carbone courtes de longueur de 5 mm et de diamètre de 10  $\mu\text{m}$  noyées dans du béton, afin de réaliser un béton capable d'autocontrôler son endommagement.

Des échantillons de béton chargés en fibres de carbone sont soumis à des cycles de chargement de contrainte, soit en compression, soit en traction. La résistance électrique du matériau est mesurée à l'aide de la méthode des quatre pointes. Les contacts électriques sont effectués grâce à de la peinture d'argent. La contrainte maximum des cycles correspond à un tiers de la contrainte à la rupture pour la compression et à la moitié de la contrainte à la rupture pour la traction. Les cycles de chargement s'effectuent dans les deux cas pour un régime de déformation largement réversible.



**Fig. 1-25 : Courbe de la résistance électrique pour des cycles de compression (a) et de traction (b) d'un composite béton/fibres de carbone coupées [44]**

Les résultats en traction et en compression sont présentés sur les figures 1-25-a et 1-25-b. L'analyse de la courbe de variation de la résistance électrique lors de l'essai de traction montre que durant le premier chargement, il se produit un accroissement de la résistance électrique irréversible. Celui-ci serait dû à un affaiblissement des interfaces

fibre/matrice entraînant une diminution des contacts électriques. Les chargements suivants entraînent des accroissements réversibles de la résistance électrique provoqués selon l'auteur par l'ouverture de fissures dans la matrice au niveau des fibres de carbone. Les déchargements produisent des baisses de résistance électrique expliquées par la fermeture des fissures. La courbe de résistance électrique en compression peut être expliquée avec les mêmes raisonnements. Il convient de remarquer que même pour des déformations réversibles, une partie de la réponse du capteur est irréversible.

### 1.4.3. Utilisation des fibres de renfort continues d'un composite carbone/résine

#### 1.4.3.1. Modélisation électrique d'un composite à renfort unidirectionnel

Pour les composites à fibre de carbone, les fibres de renfort peuvent être utilisées directement comme capteurs d'endommagement. Si la résistance électrique est mesurée entre les deux extrémités d'une éprouvette en composite unidirectionnel dans le sens des fibres, la résistance électrique correspond en première approximation à celle d'un arrangement en parallèle de toutes les fibres de carbone [45] (cf. fig. 1-26-a). La résistance électrique équivalente de ce modèle idéalisé est alors donnée par :

$$R_0 = \frac{R_F}{N} \quad (1-24)$$

où  $R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_N = R_F$ ,  $R_F$  correspondant à la résistance électrique de chaque fibre et  $N$  au nombre total de fibres. Si  $n$  fibres de carbone sont coupées le changement de résistance électrique est donné par :

$$\left( \frac{\Delta R_r}{R_0} \right)_n = \frac{(n/N)}{1 - (n/N)} = \frac{n}{N - n} \quad (1-25)$$

En faisant l'hypothèse d'une distribution uniforme des fibres de carbone dans la matrice l'équation (1-25) peut se réécrire :

$$\left( \frac{\Delta R}{R_0} \right)_n = \frac{\left( \frac{\Delta L}{L_0} \right)}{1 - \left( \frac{\Delta L}{L_0} \right)} \quad (1-26)$$

où  $\Delta L$  est la longueur de l'échantillon perpendiculaire aux fibres de renfort ne conduisant plus électriquement et  $L_0$  la longueur initiale de l'éprouvette. En fait un modèle plus réaliste est représenté par la figure 1-26-b où les résistances électriques  $R_{S1}$ ,  $R_{S2}$ ... représentent les résistances électriques transverses dues aux connexions des différentes fibres de carbone entre elles, en extrémité d'éprouvette, réalisées généralement par de la peinture

conductrice à l'argent.  $R_w$  représente la résistance électrique des câbles de connexion avec l'appareil de mesure. Dans son modèle Prabhakaran [45] considère seulement la présence de résistances électriques transverses aux extrémités de l'éprouvette. Mais d'après Schulte [46], il existe aussi une résistance électrique transverse à l'intérieur même de l'échantillon. En effet, Schulte a montré l'existence d'un courant électrique perpendiculaire à la direction des fibres de carbone dans une éprouvette unidirectionnelle carbone/époxy, qui augmente en fonction de la fraction volumique en fibre de l'échantillon (cf. fig. 1-27). Ce courant est dû aux contacts transverses des différentes fibres de carbone entre elles.

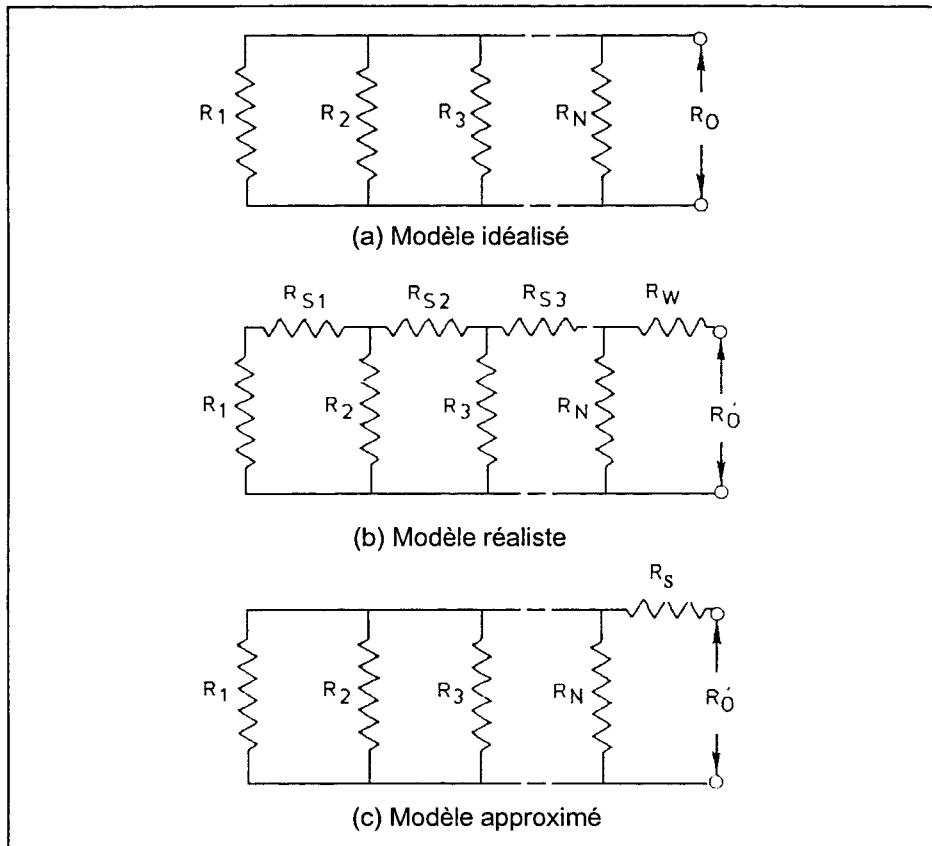


Fig.1-26 : Modèles électriques d'un composite carbone/époxy [45]

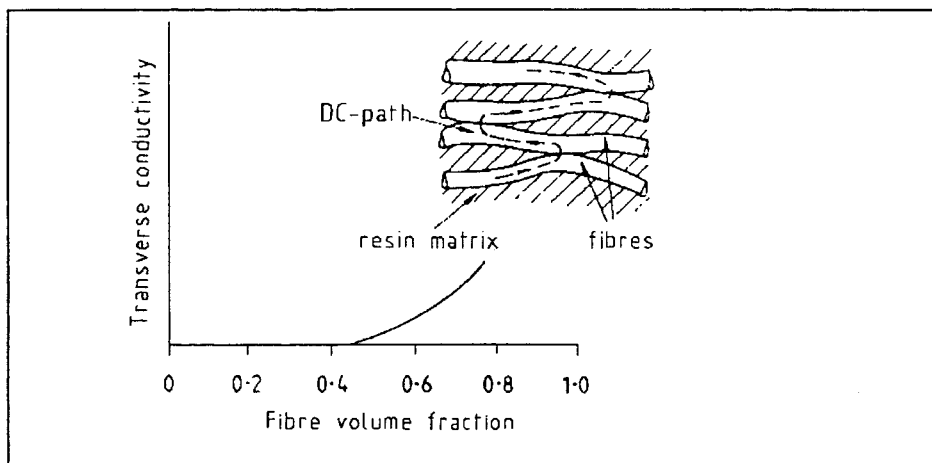
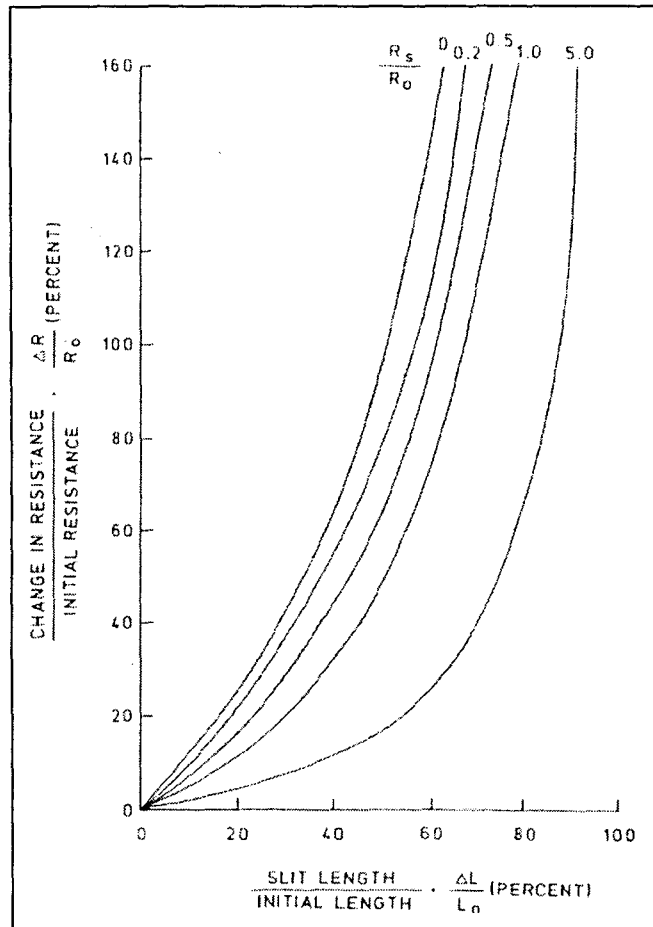


Fig. 1-27 : Augmentation de la conductivité transverse en fonction de la fraction volumique en fibre [46]

Si l'on considère un modèle simplifié (cf. fig. 1-26-c) où  $R_s$  représente la résistance électrique transverse de l'échantillon, le changement de résistance de l'échantillon est donné par :

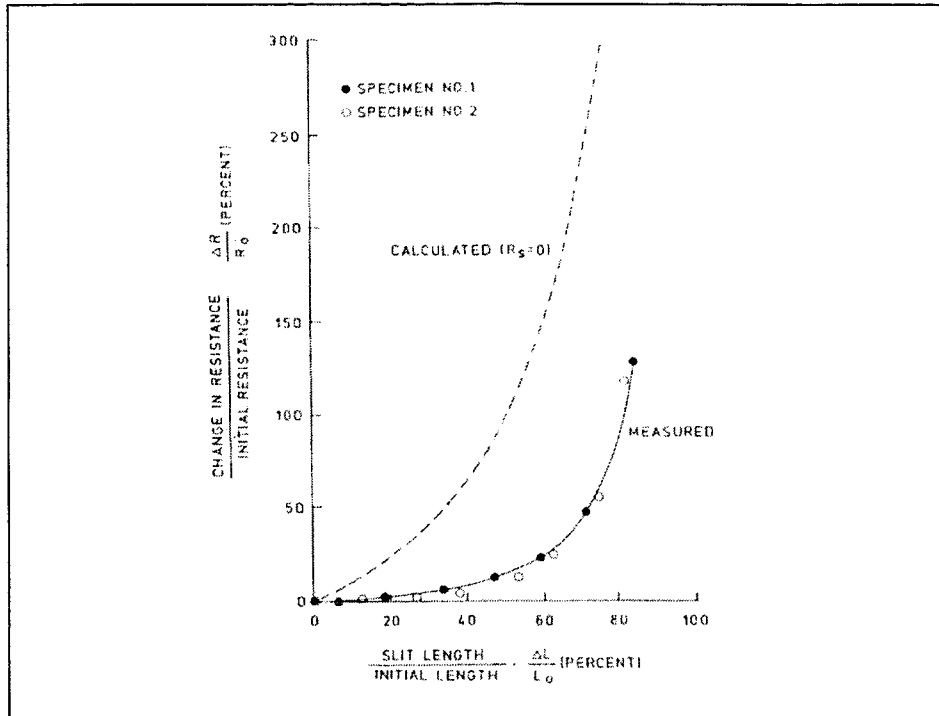
$$\left(\frac{\Delta R}{R_0}\right)_n = \left[ \frac{\left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)}{1 - \left(\frac{\Delta L}{L_0}\right)} \right] \left[ \frac{1}{1 + \left(\frac{R_s}{R_0}\right)} \right] \quad (1-27)$$



**Fig. 1-28 : Courbes de résistance électrique en fonction de la longueur de fissuration [50]**

La figure 1-28 représente les courbes obtenues pour différentes valeurs de  $R_s/R_0$ . L'effet de la résistance électrique transverse se traduit par une diminution de la sensibilité initiale et par le déplacement de la courbe vers la droite.

Pour confronter cette analyse à l'expérience, un test a été effectué sur un échantillon carbone/époxy de 32 plis de structure  $[45/0/-45/90]_{4s}$ . Une coupe parallèle aux extrémités métallisées est réalisée avec une scie diamantée par pas successifs. A chaque pas, la résistance électrique de l'échantillon est mesurée ainsi que la longueur de la fente. Les valeurs expérimentales de la résistance électrique sont largement inférieures à celles calculées sans tenir compte de la résistance  $R_s$  (cf. fig. 1-29), ce qui montre l'importance de la conductibilité électrique transverse.



**Fig. 1-29 : Comparaison de la réponse électrique d'une éprouvette avec le modèle théorique [45]**

Grâce à la courbe de changement de la résistance électrique par rapport à la section de l'éprouvette, Prabhakaran [45] relie la variation de résistance électrique à une fissuration équivalente. Cette notion de fissure équivalente peut être reprise lors de d'expérience de traction ou de fatigue dynamique. Ainsi Prabhakaran a observé lors d'une expérience en fatigue dynamique une augmentation de 12 % de la résistance électrique juste avant la rupture, ce qui correspond à une fissure équivalente de 15 % de la longueur de l'échantillon.

### 1.4.3.2. Résultats expérimentaux

#### 1.4.3.2.1. Essais de délaminage

Fischer [47] a mis au point une méthode électrique afin de déterminer la résistance à la rupture en mode I sur éprouvettes de type DCB (doubles poutres encastées). La technique classique est une méthode optique qui consiste à mesurer visuellement par un télescope la propagation de la fissuration, lorsque les deux bras de l'éprouvette sont soumis à un effort de traction perpendiculaire au plan des plis. La méthode électrique consiste à mesurer la résistance électrique entre les deux bras de l'éprouvette qui augmente proportionnellement avec la longueur du délaminage. Si l'on mesure la longueur du délaminage au début du test  $l_i$  et celle à la fin du test  $l_f$ , la longueur de fissure  $l_t$  à l'instant  $t$ , sera donnée par :

$$l_t = l_i + (R_t - R_i) \left( \frac{l_f - l_i}{R_f - R_i} \right) \quad (1-28)$$

où  $R_t$  est la résistance électrique à l'instant  $t$ ,  $R_i$  la résistance initiale et  $R_f$  la résistance finale. Pour mesurer les résistances électriques, les deux bras de l'éprouvette sont connectés à une source de tension et un montage en pont de Wheatstone est utilisé (cf. fig. 1-30).

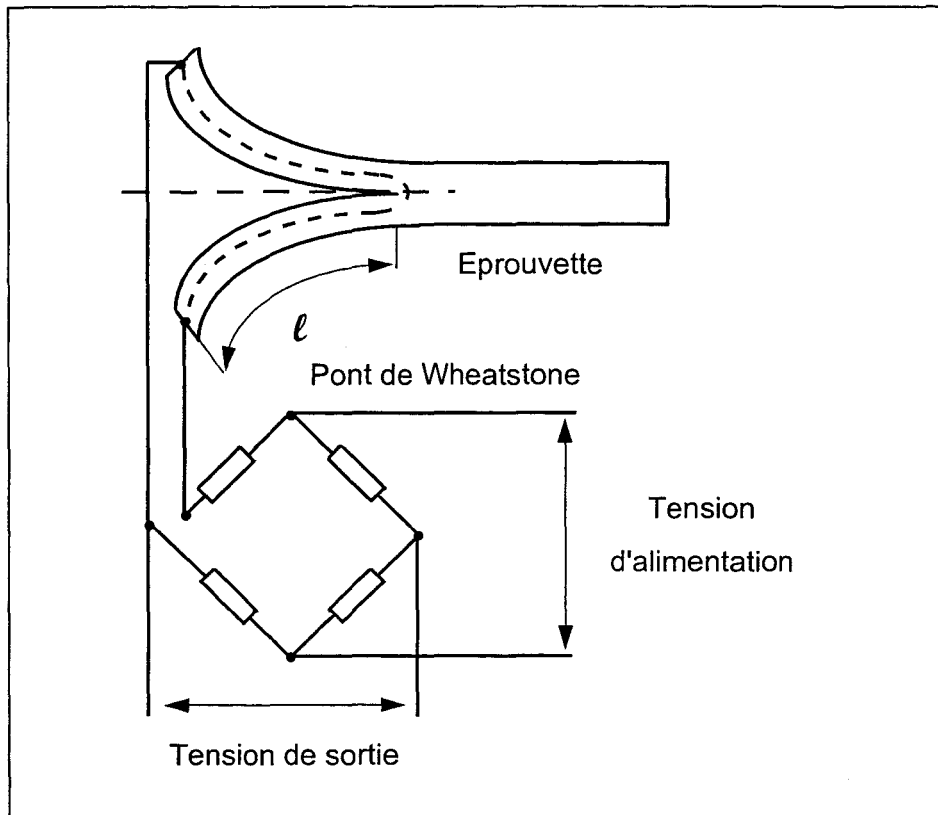


Fig. 1-30 : Montage expérimental de mesure électrique de la longueur de fissure [47]

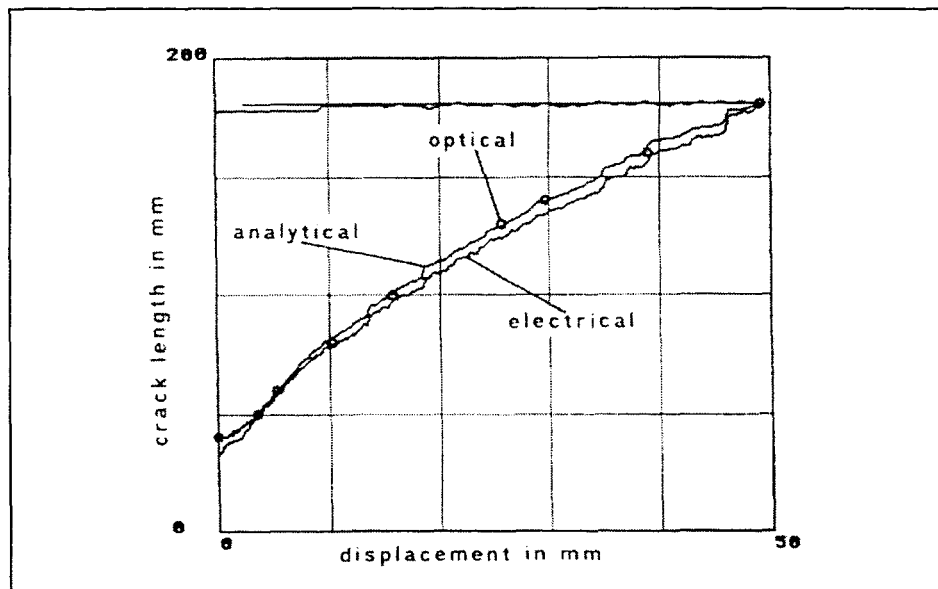


Fig. 1-31 : Comparaison des différentes méthodes de mesure de la longueur de fissure [47]



Par rapport à la technique optique, la méthode électrique présente l'avantage d'autoriser des mesures en continu. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 1-31. La courbe analytique est déterminée à partir de la théorie de la flexion non linéaire. La courbe électrique donne une longueur de fissuration légèrement inférieure à celle donnée par les autres méthodes, ce qui peut être dû aux ponts de fibres qui se créent à l'avant de la fissure et qui permettent le passage du courant électrique.

#### 1.4.3.2.2. Essais de flexion

Ceysson [48] a réalisé une étude en flexion trois points sur des composites carbone/époxy avec des renforts orientés à  $0^\circ$  (unidirectionnels) et  $\pm 45^\circ$ .

Dans le cas de composites  $0^\circ$  sollicités dans le sens des fibres, c'est une rupture des fibres qui entraîne l'augmentation de la résistance électrique. Une conductivité transversale a aussi été mise en évidence pour des taux de fibres suffisants ( $V_f > 50\%$ ). La conduction se fait alors uniquement par les contacts interfibres entre fibres adjacentes (la matrice époxy étant isolante  $\rho = 10^{13}$  à  $10^{15} \Omega.m$ )

Dans le cas de composites  $\pm 45^\circ$ , la conduction provient des chemins électriques qui existent entre les fibres de carbone. Les diminutions de la résistance électrique sont dues à la réduction des contacts interfibres. La conduction s'effectue d'une part entre les fibres de carbone d'un même pli mais aussi entre les différents plis du stratifié. Il est possible ainsi de mettre en évidence l'apparition de microfissures matricielles interfibres et de délaminages interplis qui dans les deux cas provoquent une diminution des contacts entre fibres. Les résultats obtenus lors d'un essai en flexion d'un composite  $\pm 45^\circ$  sont reportés sur la figure 1-32. Une comparaison avec une courbe d'émission acoustique a permis de vérifier la fiabilité de cette technique.

Trois zones peuvent être identifiées qui correspondent à divers types d'endommagement :

- Pour la première zone (entre 0 et 1,5 % de déformation) l'augmentation de la résistance électrique est due à l'amorçage des fissurations dans la matrice qui provoque une réduction du nombre de chemins conducteurs entre fibres. L'amorçage des fissurations est par ailleurs confirmé par l'augmentation de l'émission acoustique.
- Pour la zone II (entre 1,5 et 2,5 % de déformation), les fissurations transverses se propagent et se multiplient rapidement, ce qui provoque des délaminages interplis. Quand les délaminages apparaissent le contact entre les différents plis n'est plus assuré, ce qui entraîne une forte augmentation de la résistance électrique.
- Dans la zone III (après 2,5 % de déformation), il se produit l'ouverture des fissures déjà existantes et des glissements entre les différents plis. Ces phénomènes entraînent des variations de résistance électrique mais pas d'augmentation globale significative, ce qui explique l'arrêt de l'augmentation de la courbe de résistance électrique. En revanche, les phénomènes de frictions qui sont engendrés (frictions fibre/fibre et fibre/matrice) provoquent l'augmentation continue de la source d'émission acoustique.

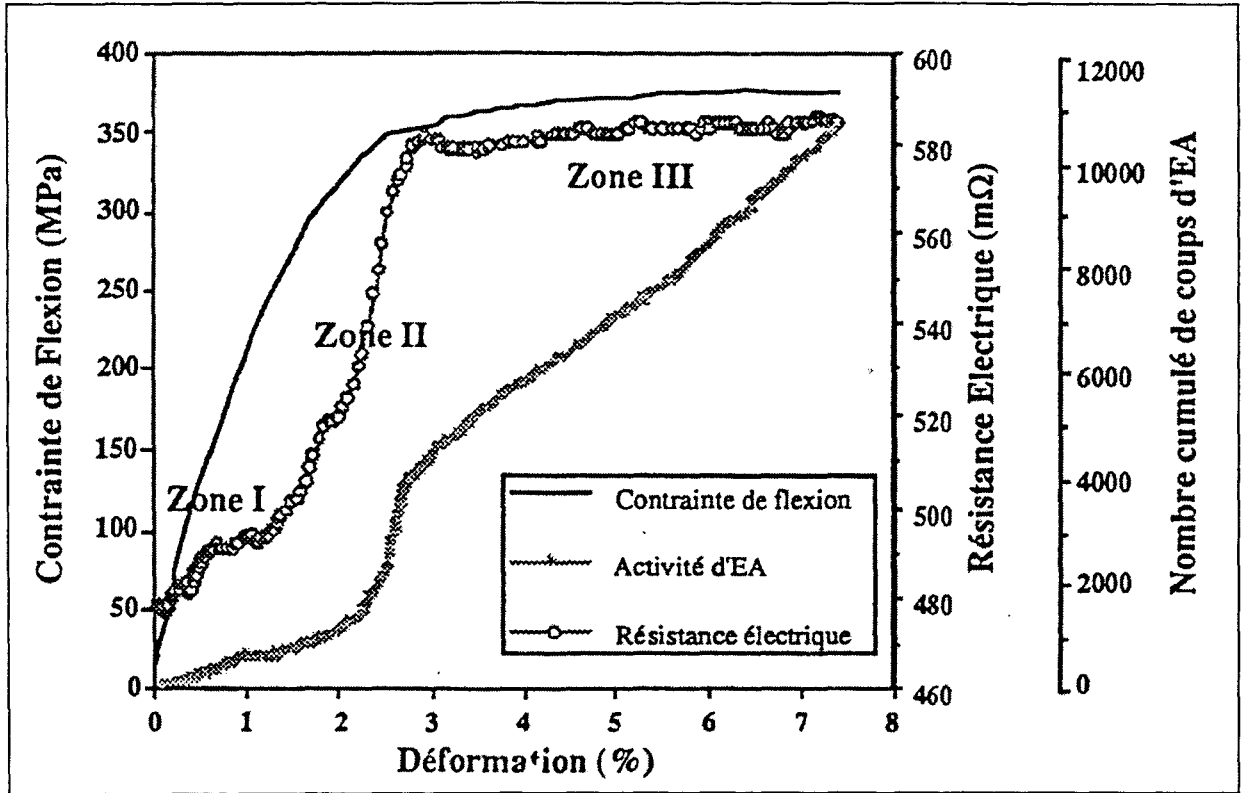


Fig. 1-32 : Stratifié carbone/époxy  $\pm 45^\circ$  sollicité en flexion 3 points : évolution de la contrainte de flexion, de la résistance électrique et des mesures d'émission acoustique en fonction de la déformation [48]

#### 1.4.3.2.3. Essais de traction statique

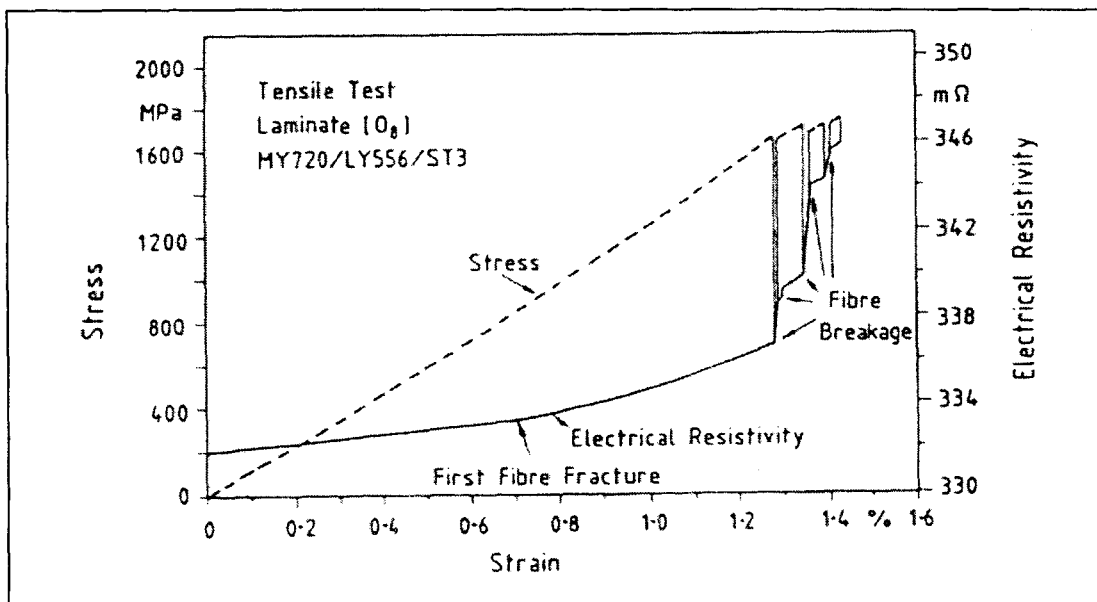


Fig. 1-33 : Essai de traction sur un composite carbone unidirectionnel [46]

Schulte [46] a effectué des expériences en traction statique sur un composite unidirectionnel carbone/époxy (cf. fig. 1-33). Il constate un accroissement linéaire dû à l'élongation des fibres (augmentation de la longueur des fibres, diminution de la section) jusqu'à 0,7 % de déformation. Ensuite le comportement devient non linéaire, ce qui correspond aux premières ruptures des fibres. Les premières variations importantes en marches d'escalier apparaissent vers 1,3 % de déformation, soit très près de la déformation à la rupture du matériau.

#### 1.4.3.2.4. Essais sous chargement de fatigue

Schulte [46] a aussi effectué des essais de fatigue dynamique sur un composite carbone/époxy de structure  $[0_2,90_2,0_2,90_2]_s$  avec un rapport  $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$  constant et égal à 0,1 (avec  $\sigma_{\min}$  contrainte minimum et  $\sigma_{\max}$  contrainte maximum). Durant l'essai la contrainte maximum est augmentée par paliers successifs. Le module sécant de l'éprouvette, la température et la résistance électrique sont mesurés. La figure 1-34 montre que la résistance électrique augmente en fonction du nombre de cycles. En particulier lorsque la contrainte maximum passe à un niveau supérieur, la résistance électrique augmente de façon significative. A la fin de l'essai la résistance électrique augmente en marches d'escalier, ce qui traduit la rupture des fibres de renfort orientées à  $0^\circ$ . La courbe de résistance électrique a tendance à légèrement décroître lorsque la contrainte maximale est portée à 720 MPa. Cela est dû à l'augmentation importante de la température de l'éprouvette.

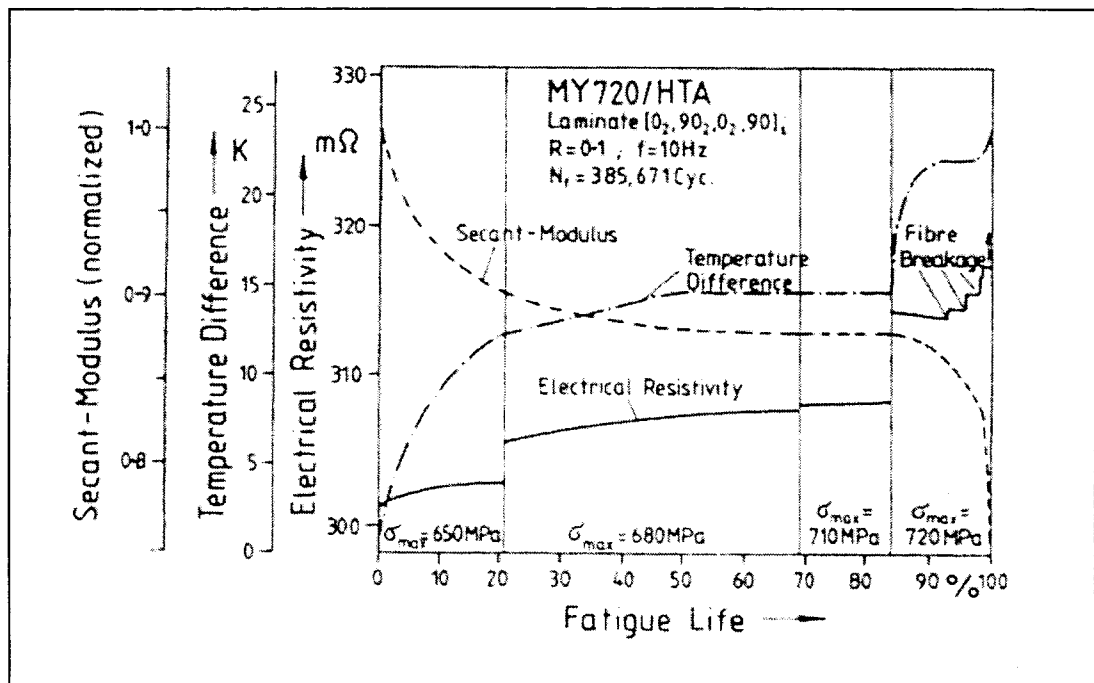


Fig. 1-34 : Variation du module sécant de la température et de la résistance électrique durant un chargement en fatigue dynamique [46]

### 1.4.3.2.5. Influence de la température

L'augmentation de la température entraîne une diminution de la résistance électrique de l'échantillon comme le montre la figure 1-35 pour une pièce composite carbone/époxy  $[0_2/90_2/0_2/90_2]_s$ , parcourue par un courant électrique constant de 50 mA. Une diminution de 0,14 mΩ par degré Celsius est enregistrée.

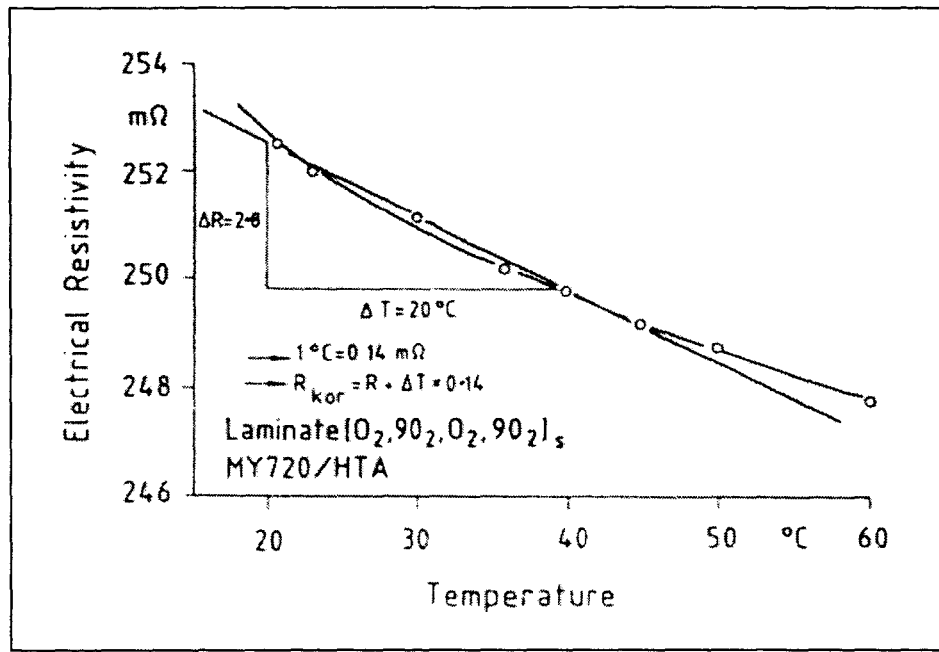


Fig. 1-35 : Variation de la résistance électrique en fonction de la température [46]

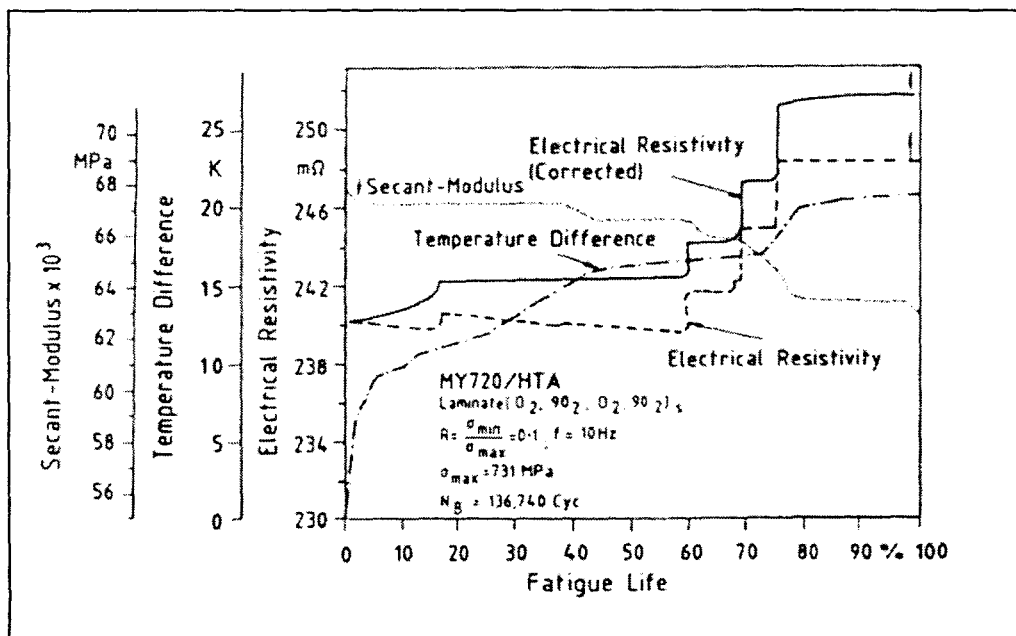


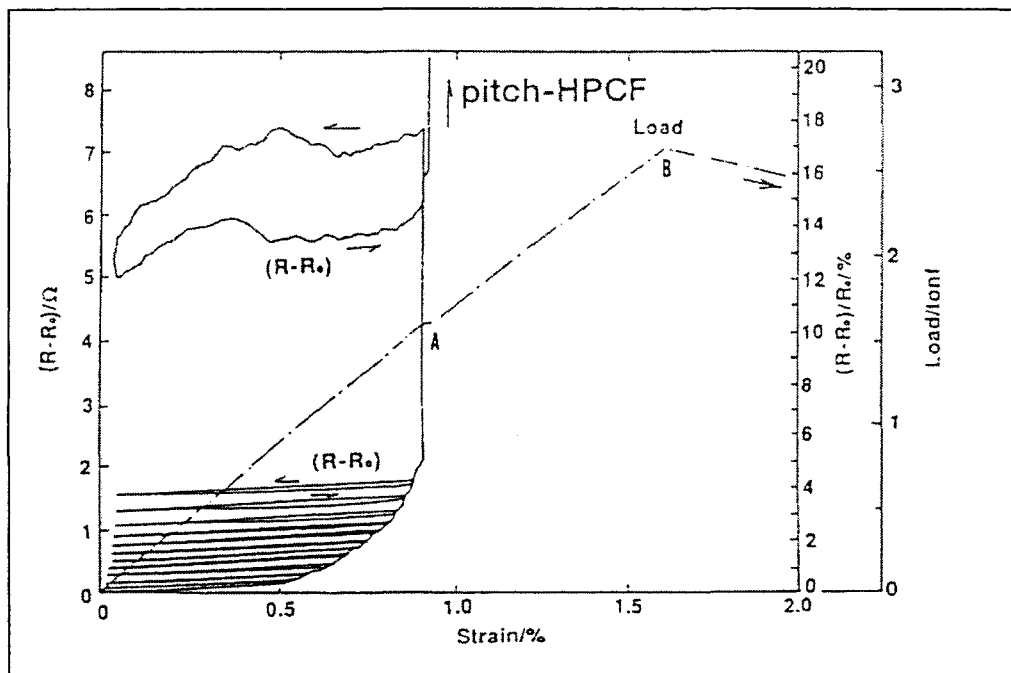
Fig. 1-36 : Correction de la résistance électrique par rapport aux variations de température lors d'un essai de fatigue [46]

A partir de cette courbe donnant la résistance électrique en fonction de la température, il est possible de corriger les valeurs de la résistance électrique afin de faire disparaître la contribution due à l'échauffement de l'échantillon lors des essais de fatigue dynamique (cf. fig. 1-36).

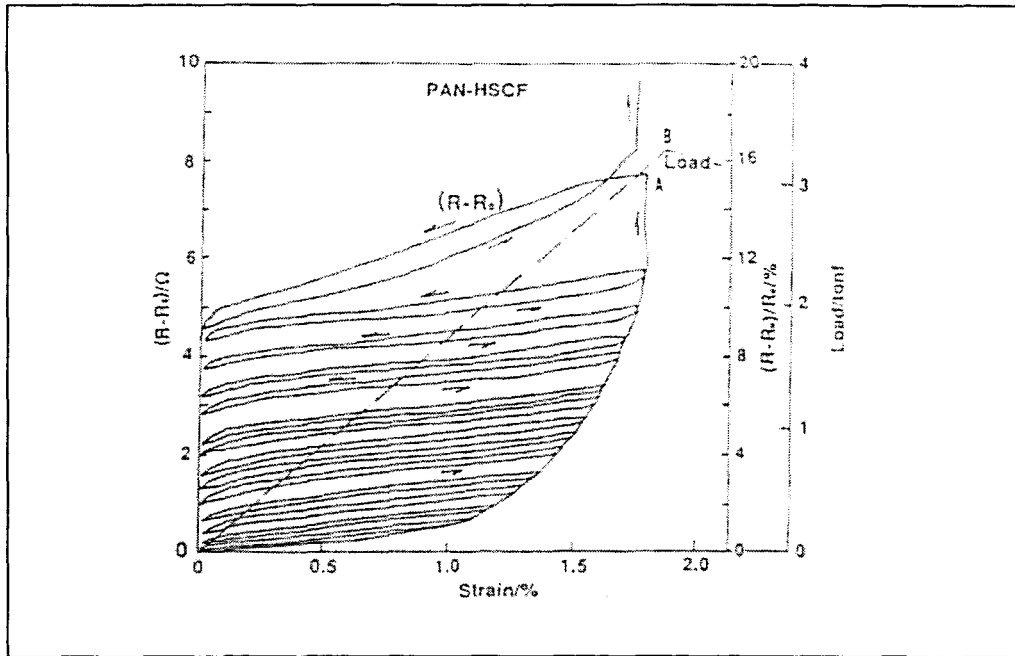
#### 1.4.4. Application à un composite fibre de verre/résine

Muto et al. [49] ont utilisé des fibres de carbone comme capteurs d'endommagement pour des composites unidirectionnels fibres de verre/résine. Les échantillons sont réalisés à partir d'une matrice vinylester, de fibres de verre ayant un allongement à la rupture de 4,8 % et, suivant les échantillons, de fibres de carbone de trois types différents dont les allongements à la rupture sont de 0,8 % (pitch-HPCF), 1 % (PAN-HMCF), et 1,7 % (PAN-HSCF). Le taux de fibres de verre en volume dans la matrice est de 31,6 % et celui des fibres de carbone varie suivant le type de fibres entre 0,33 % et 0,38 %. Les fibres de carbone sont incorporées unidirectionnellement dans la matrice.

Six jauges de déformation sont collées en surface. La détermination de la résistance électrique est effectuée par une mesure simultanée du courant et de la tension. Le courant est maintenu constant à 1 mA et les changements de tensions dus aux contraintes subies par l'échantillon sont traduits en variation de résistance électrique. Les échantillons sont soumis à des essais de traction cyclique à une vitesse de 1 mm/min., avec une augmentation progressive de la déformation maximale pour chaque cycle successif.



**Fig. 1-37 : Variation de la résistance électrique, de la résistance électrique relative et de la contrainte en fonction de la déformation pour un composite verre/vinylester comportant des mèches de carbone d'allongement à la rupture de 0,8 % [49]**



**Fig. 1-38 : Variation de la résistance électrique, de la résistance électrique relative et de la contrainte en fonction de la déformation pour un composite verre/vinylester comportant des mèches de carbone d'allongement à la rupture de 1,7 % [49]**

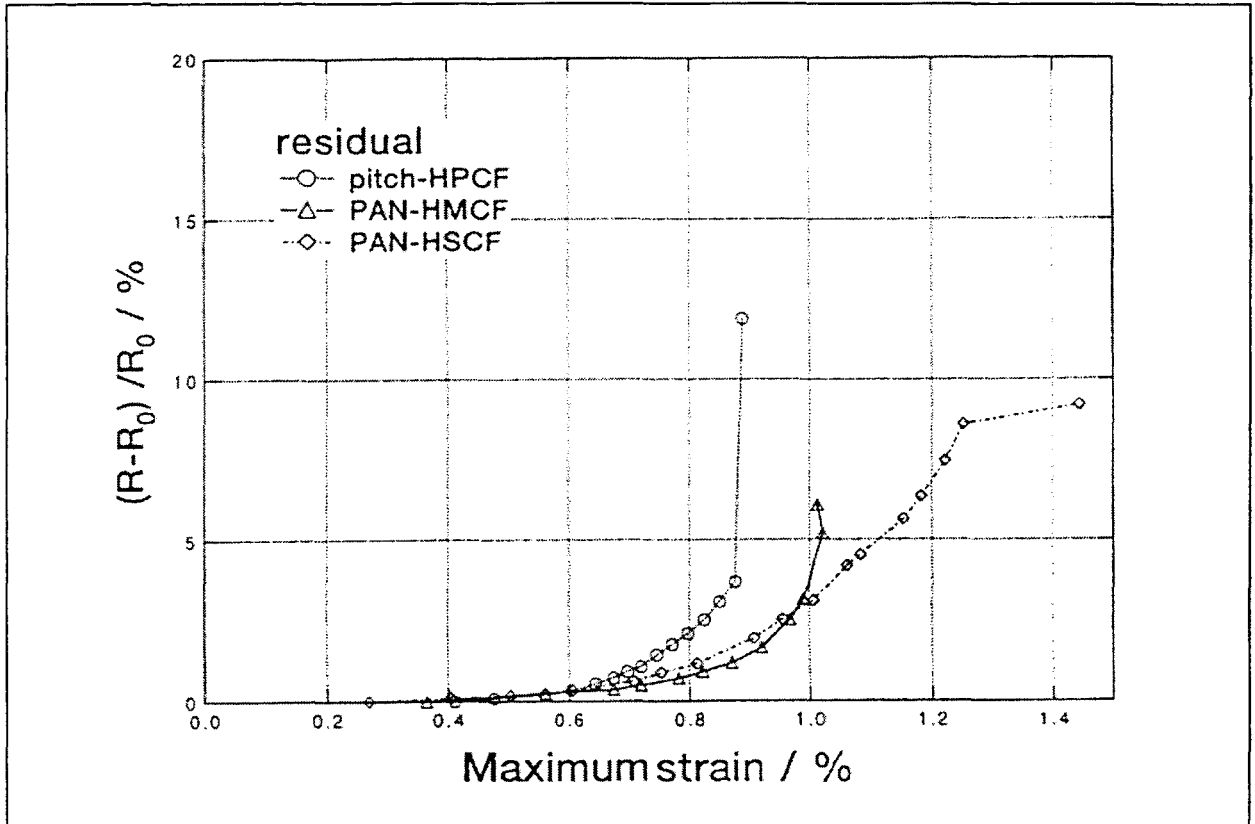
Les résultats obtenus pour deux types d'échantillons sont présentés sur les figures 1-37 et 1-38. Les changements de la résistance électrique sont dus d'une part à l'élongation des fibres de carbone et d'autre part à leurs ruptures. Cependant le premier effet entraîne une augmentation de la résistance électrique très faible.

Le point A correspond à l'instant où toutes les mèches de carbone sont rompues, la résistance électrique devient alors infinie. La rupture finale de l'éprouvette est, quant à elle, visualisée par le point B. L'augmentation brutale de la résistance électrique constitue un signal facilement détectable qui permet d'indiquer que la charge à la rupture du matériau est proche.

Pour les échantillons contenant les fibres de carbone d'élongation maximale 0,8 %, la rupture du matériau survient bien après le point A, alors que pour les échantillons contenant des fibres de carbone d'élongation à la rupture de 1,7 %, les points A et B sont trop proches pour que le signal de prévention à la rupture soit efficace. Il convient donc d'utiliser des fibres conductrices de faible élongation à la rupture, associées avec des fibres de verre ayant une élongation à la rupture beaucoup plus importante. En fait en choisissant judicieusement un type de fibres de carbone d'allongement à la rupture donnée, il est possible de contrôler le positionnement du point A, correspondant au signal préventif, sur la courbe contrainte/déformation.

Il est intéressant de remarquer que lors d'un chargement, la résistance électrique augmente de façon quasi linéaire avec la déformation jusqu'au maximum de déformation appliqué au cycle précédent. Une fois ce point dépassé, il y a une augmentation abrupte de la résistance électrique. Ce phénomène peut être rapproché de l'effet Kaiser qui intervient en émission acoustique : les signaux d'émission acoustique ne sont générés que lorsque la déformation maximale précédemment appliquée est dépassée.

Lors de la suppression progressive de la contrainte, la résistance électrique décroît faiblement. Cette baisse de résistance électrique est due à la remise en contact partielle des fibres de carbone fracturées entre elles. Cependant il reste toujours une résistance électrique résiduelle non négligeable, qui augmente avec la contrainte maximale appliquée. La figure 1-39 montre que la résistance électrique résiduelle augmente en fonction de la déformation maximale appliquée de façon non linéaire : plus la déformation est importante plus l'augmentation de la résistance électrique résiduelle est rapide pour les mèches de carbone pitch-HPCF et PAN-HMCF.



**Fig. 1-39 : Variation de la résistance électrique résiduelle en fonction de la déformation maximale appliquée pour différentes mèches de carbone [49]**

Grâce à cette résistance électrique résiduelle, qui peut être associée à l'endommagement du matériau, le capteur développé peut mémoriser les endommagements subis par le matériau même lorsque celui-ci n'est plus sous contrainte. Une méthode basée sur le contrôle de la résistance électrique résiduelle permet donc de détecter les modifications structurales éventuelles du matériau.

## 1.5. Conclusion : choix d'un capteur et programme de recherche

Le capteur retenu pour l'application visée (suivi d'endommagement d'un composite verre/résine constitutif d'une structure du type pale d'éolienne) doit être facile d'utilisation, de technologie simple, économique et altérant le moins possible les propriétés mécaniques du matériau composite hôte. Or l'analyse de la littérature scientifique et technique permet de dresser un bilan des différentes solutions envisageables avec leurs caractéristiques et contraintes propres.

Les interféromètres à fibres optiques nécessitent une intégration des capteurs délicate et surtout un appareillage complexe de traitement du signal en sortie. La technique de mesure d'intensité lumineuse de la fibre optique est beaucoup plus simple d'utilisation. Cependant, un tel capteur donne une information du type tout ou rien qui permet seulement d'indiquer le dépassement de l'allongement à la rupture de la fibre optique. De plus dans tous les cas, les capteurs à base de fibres optiques, du fait de leurs dimensions, présentent des problèmes d'intégration.

L'utilisation d'électrocéramiques est aussi fortement limitée par la taille des capteurs. Seuls les films et les fibres piézo-électriques sont envisageables pour servir de capteurs d'endommagement intégrés. Les résultats obtenus avec les films piézo-électriques apparaissent décevants. Les fibres piézo-électriques semblent plus prometteuses, mais leurs techniques de fabrication sont encore au stade préindustrielles. De plus les propriétés électromécaniques de tels capteurs sont fortement dépendantes du facteur température.

En revanche, les fibres de carbone ne présentent pas de problèmes d'intégration particuliers, leur diamètre étant notamment du même ordre de grandeur que celui des fibres de renfort des composites. De plus, les fibres de carbone utilisées possèdent des allongements à la rupture beaucoup plus faibles que les fibres de verre, ce qui permet, dans le cas de composites verre/résine, d'avoir des informations sur l'endommagement du matériau avant la rupture des fibres de renfort. Ce sont par ailleurs des capteurs économiques pour lesquelles les techniques d'acquisition de données sont relativement faciles à mettre en oeuvre. Les fibres de carbone apparaissent donc comme un bon candidat pour le développement de capteurs d'endommagement intégrés dans un composite, en particulier dans un composite verre/résine. Les études effectuées sur ce type de capteurs étant relativement récentes et peu nombreuses, il reste à démontrer la possibilité de réaliser un capteur à fibres de carbone fiable et de bonne sensibilité.

En conséquence, nous avons choisi dans le cadre de cette étude d'instrumenter avec des fibres de carbone des composites renforcés par des fibres de verre. Le programme de recherche engagé vise à étudier dans un premier temps, la réponse de différents types de fibres de carbone intégrées dans des éprouvettes composites verre/résine soumises à différentes sollicitations mécaniques instantanées (traction, flexion) et à long terme (chargements répétés progressifs en traction, fatigue). L'augmentation de la résistance électrique du capteur est alors corrélée avec l'endommagement subi par le matériau qui est déterminé par des mesures de contrainte/déformation et d'émission acoustique. Dans un second temps, l'instrumentation de pièces industrielles est envisagée.



**CHAPITRE II :**  
**MATERIAUX ET MOYENS**  
**EXPERIMENTAUX**

## CHAPITRE II :

### MATERIAUX ET MOYENS EXPERIMENTAUX

#### 2.1. Matériaux et structures

##### 2.1.1. Mèches de carbone utilisées comme capteurs d'endommagement résistifs

Quatre types de mèches de carbone présentant différents allongements à la rupture sont utilisés comme capteurs d'endommagement. Leurs principales caractéristiques sont reportées dans le tableau 2-1 :

Type	Allongement à la rupture (%)	Module en tension (GPa)	Nombre de filaments	Diamètre d'un filament ( $\mu\text{m}$ )
TORAYCA <sup>®</sup> T700 SC	2,1	230	12000	10
Carbone HR-3K	1,5 à 1,7	-	3000	-
TORAYCA <sup>®</sup> M 40	0,6	392	1000, 3000, 6000, 12000	6,5
DIALEAD <sup>®</sup> K13A10	0,36	790	10000	10

**Tableau 2-1 : Caractéristiques des mèches de carbone utilisées**

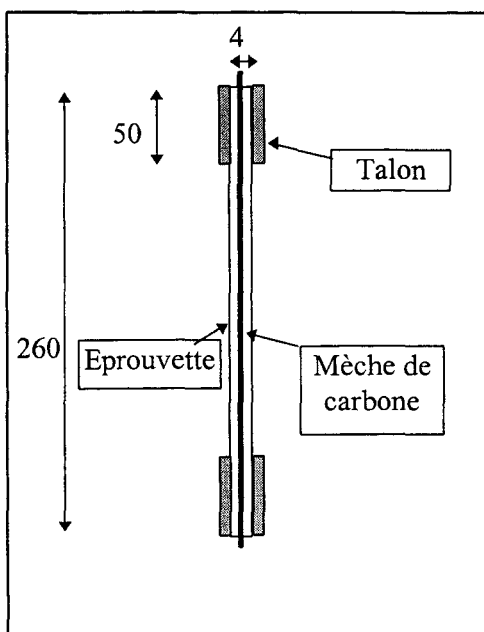
#### 2.1.2. Eprouvettes

##### 2.1.2.1. Descriptif

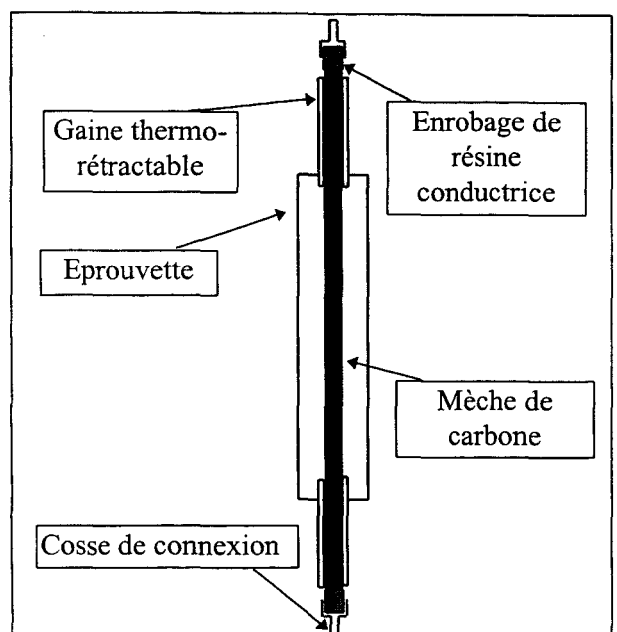
Des éprouvettes standards d'épaisseur 4 mm sont réalisées en matériau composite. Les renforts sont des textiles non tissés (cousus) de verre E. La majorité des essais sont réalisés avec un tissu [0/90°]. Ponctuellement des tissus unidirectionnels et  $\pm 45^\circ$  sont également employés. Les tissus de verre sont fabriqués par Ahlstrom et un agent d'ensimage à base de silane est employé. Une matrice vinylester (DERAKANE 411-45 ) est utilisée pour les éprouvettes de traction et une matrice polyester insaturé (M 105 T) pour les éprouvettes de flexion. Un amorceur peroxyde de méthyl-éthyl-éther-cétone (MEKPHA<sub>2</sub>) est employé dans les deux cas à un taux de 2 %. Un mélange d'octoate de cobalt et de diméthylaniline (taux de 0,5 %) est utilisé comme catalyseur pour la résine vinylester et une solution d'octoate de

cobalt (taux de 0,2 %), pour la résine polyester. Le taux de fibre de verre est de 46 % en masse (valeur moyenne). La largeur des éprouvettes est de 30 mm pour les éprouvettes destinées à des essais de traction et de 20 mm pour les éprouvettes de flexion. Pour les éprouvettes de traction, des talons d'épaisseur 2 mm sont ajoutés au niveau des mors, afin d'éviter les glissements, les ruptures dans les mors de la machine de traction et une éventuelle perturbation de la réponse du capteur due au serrage des mors (cf. fig. 2-1).

Les mèches de carbone sont intégrées entre les deux plis centraux pour les éprouvettes de traction et entre le dernier et l'avant dernier pli pour les éprouvettes de flexion. En effet lors d'un essai de flexion le plan médian de l'éprouvette correspond au plan neutre qui n'est pratiquement pas sollicité en traction/compression, alors que l'effort en traction est maximal pour le pli externe de l'éprouvette situé sur la face opposée à l'effort appliqué.

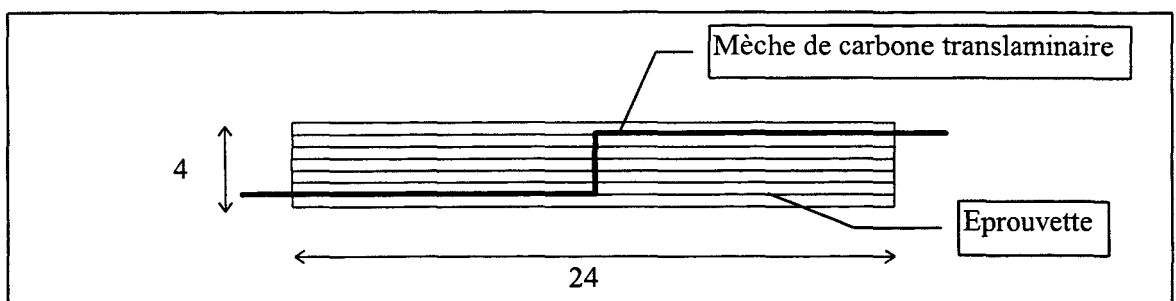


**Fig. 2-1 : Epreuve de traction vue de profil**



**Fig. 2-2 : Epreuve avec système de connexion**

Des éprouvettes contenant une mèche de carbone translaminaire sont également réalisées en vue d'effectuer des essais de cisaillement, ce qui permet à la mèche de carbone de se situer perpendiculairement aux forces de cisaillement (cf. fig. 2-3).

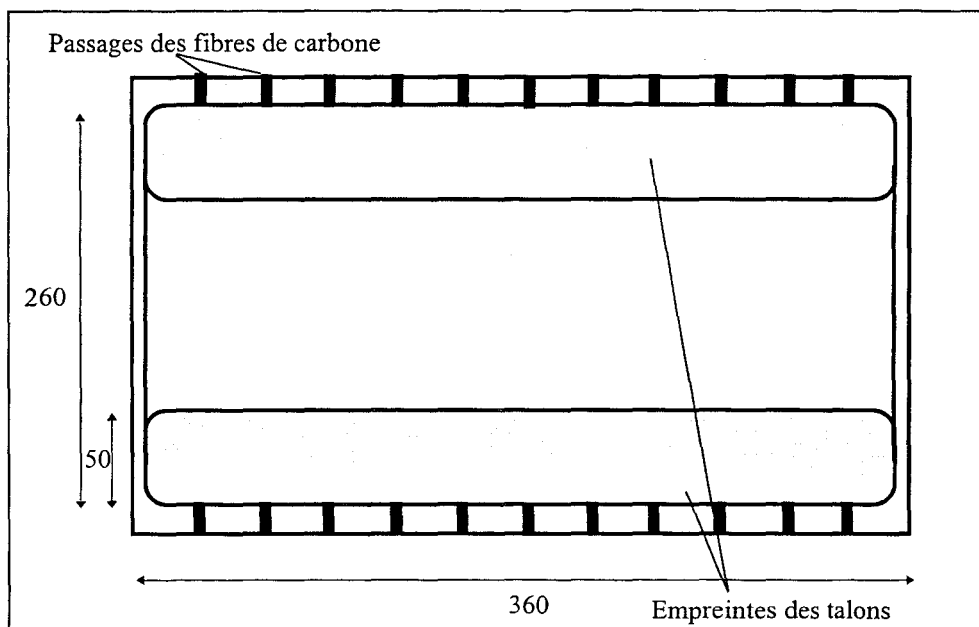


**Fig. 2-3 : Epreuve de cisaillement instrumentée avec une mèche de carbone translaminaire**

### 2.1.2.2. Fabrication

Les éprouvettes sont produites à partir d'un moule en aluminium par moulage au contact (imprégnation des tissus de renfort au pinceau, puis ébullage effectué avec un rouleau cannelé). Le moule est usiné de manière à fabriquer directement les éprouvettes avec talons intégrés et comporte des guides pour les mèches de carbone (cf. fig. 2-4). Il permet de réaliser une plaque contenant onze éprouvettes.

Les fibres de carbone servant de capteur sont intégrées lors de l'imprégnation des plis, et tendues par un système de masselottes, afin d'assurer une tension identique des mèches de carbone dans les différentes éprouvettes (cf. fig. 2-5). A l'extrémité de chaque fibre une masselotte est attachée à l'aide d'une pince. Un support est ajouté pour maintenir les fibres horizontales sur quelques centimètres à la sortie du moule. Celui-ci permet d'éviter que la résine ne coule le long des fibres lors du serrage du moule. Une post cuisson de 18 heures à 60°C est ensuite effectuée.



**Fig. 2-4 : Moule en aluminium**

Le problème de la connexion entre les éprouvettes et le circuit extérieur est résolu par l'enrobage de l'extrémité des mèches de carbone par du verni conducteur à l'argent (cf. fig. 2-2). En effet, la variation de la résistance électrique de la mèche de carbone se fait par rupture des fibres et les mèches utilisées contiennent plusieurs milliers de filaments; le verni conducteur permet donc de s'assurer que chaque filament est bien pris en compte lors des mesures de résistance électrique. Cela facilite aussi les connexions avec le circuit extérieur, en rigidifiant l'extrémité des mèches de carbone, ce qui permet l'utilisation de cosse de connexion classiques. Une gaine thermo-rétractable est placée sur la partie de la mèche qui sort de l'éprouvette, pour permettre d'une part de protéger la mèche de carbone durant la fabrication de l'éprouvette et d'autre part d'éviter les faux contacts avec les mors durant les essais de traction.

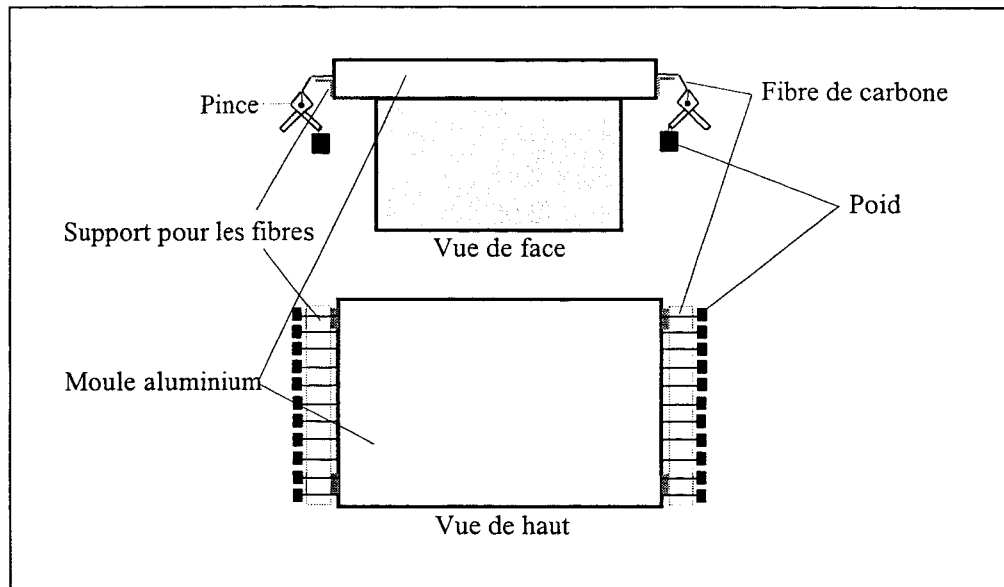


Fig. 2-5 : Système de tension des fibres

### 2.1.3. Tubes

Une première validation des capteurs d'endommagement sur pièces industrielles simples sous chargement biaxial est menée sur des tubes soumis à une pression interne. Les tubes utilisés sont les tubes Wavin Repox, destinés aux circuits d'eau des centrales nucléaires d'E.D.F. Ces tubes de diamètre 100 mm sont réalisés par enroulement filamentaire de mèches de verre E avec un angle de bobinage de  $\pm 55^\circ$  et une matrice époxy. Lors des essais sous pression interne, afin d'assurer l'étanchéité du tube durant la mise en pression, des embouts étanches sont placés aux deux extrémités du tube. Ces embouts sont constitués d'un bouchon interne métallique conique muni d'un joint torique en PTFE, de griffes de serrage internes et d'un collier de serrage externe.

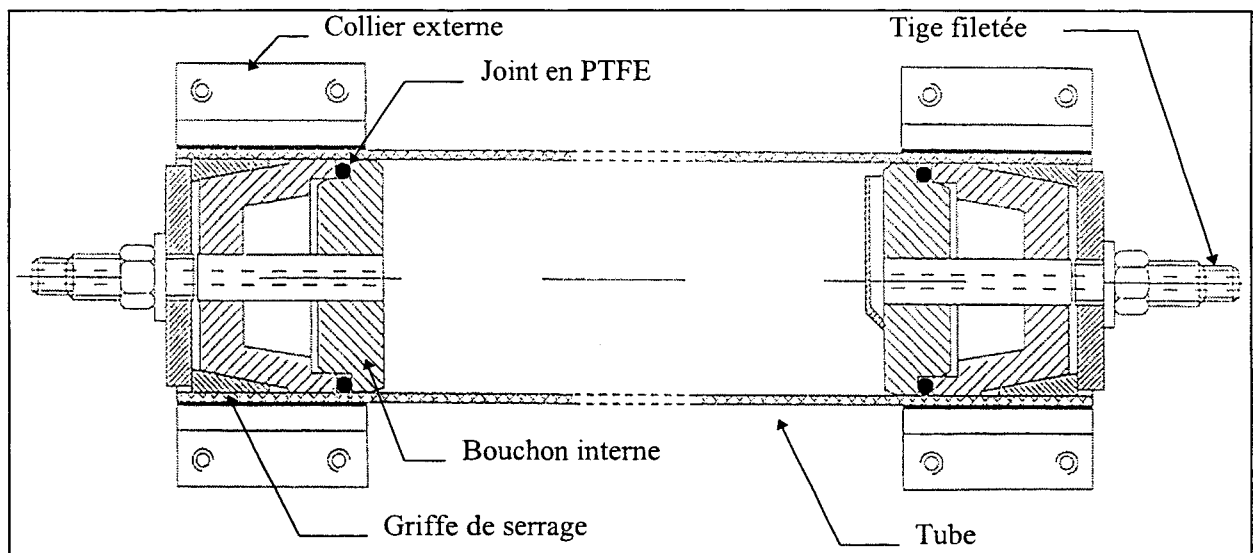


Fig. 2-6 : Embouts d'étanchéité des tubes

### 2.1.4. Sièges pour transport ferroviaire

La validation des capteurs d'endommagement sur pièces industrielles complexes est réalisée sur des sièges en S.M.C. (Sheet Moulding Compounds) dont un schéma simplifié est donné sur la figure 2-7, et qui sont destinés à équiper un métro. Le matériau utilisé est constitué d'une matrice polyester, de fibres de verre coupées (20 mm) et de charges minérales. Le taux en masse de renfort en verre obtenu après calcination et traitement chimique est de 22 % et le taux en masse de charges minérales de 37 %.

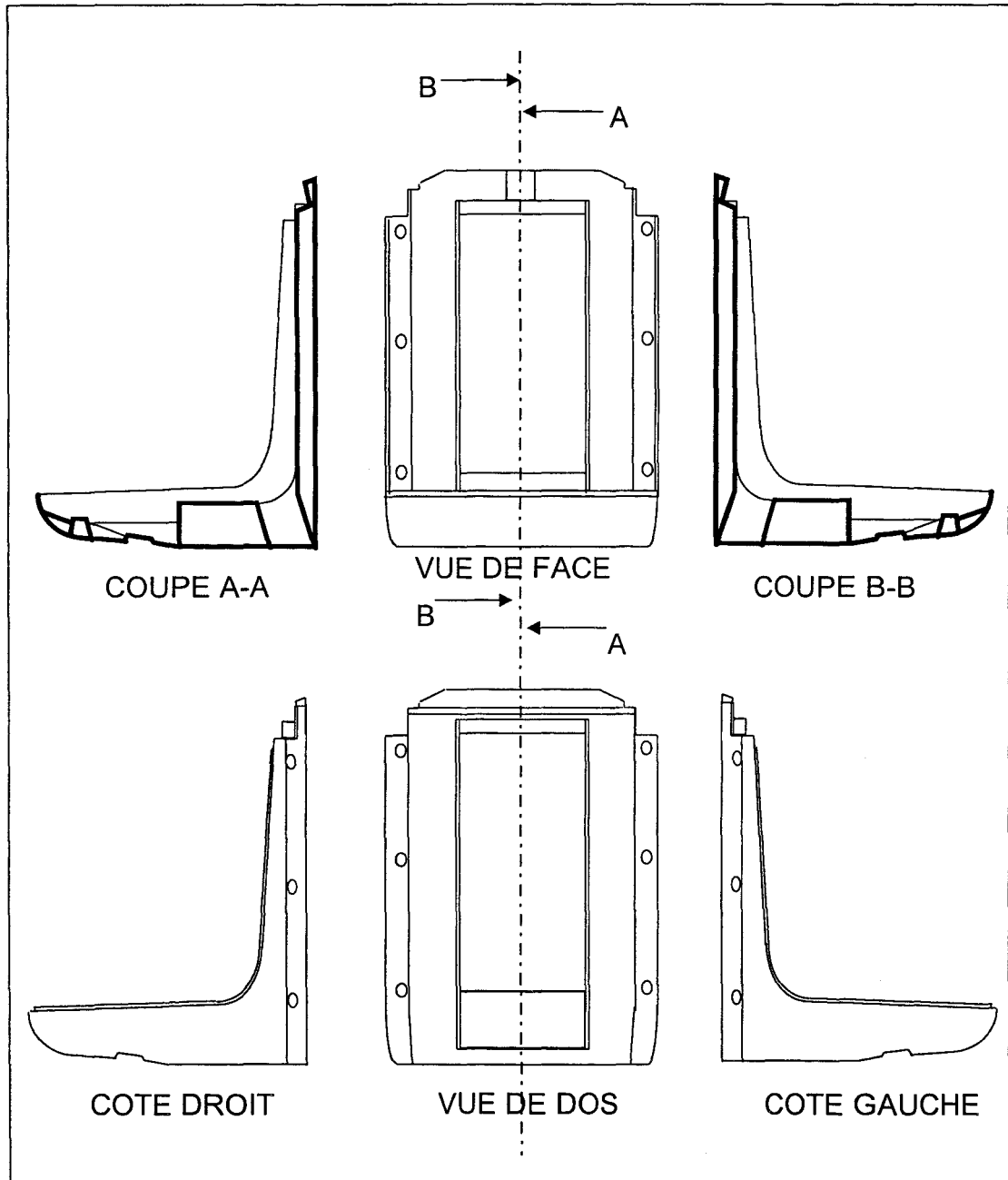


Fig. 2-7 : Schéma des sièges GEC-ALSTHOM

## 2.2. Moyens expérimentaux

### 2.2.1. Mesure de la résistance électrique des fibres de carbone

#### 2.2.1.1. Pont diviseur

Le montage en pont diviseur constitue un moyen simple et économique de mesurer la résistance électrique de la mèche de carbone. La tension  $V$  est mesurée aux bornes de la résistance étalon ( $R_e$ ), à l'aide de la carte d'acquisition (cf. fig. 2-8). Une résistance fixe ( $R_f$ ) permet d'optimiser la mesure, c'est à dire d'obtenir une valeur de tension initiale, la plus proche de la tension maximale lue par la carte d'acquisition. La relation entre les différentes grandeurs électriques (tension, résistance) est donnée simplement par l'application de la loi d'Ohm généralisée, ce qui permet d'obtenir la résistance électrique de la mèche de carbone par la relation suivante :

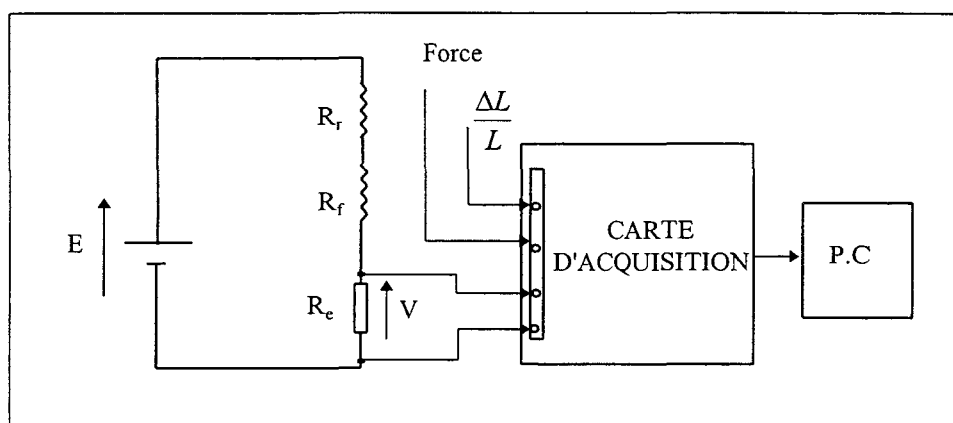
$$R_f = \frac{R_e(E - V) - VR_f}{V} \quad (2-1)$$

Avec  $R_e$  : Résistance étalon (350  $\Omega$ )

$R_f$  : Résistance de la mèche de carbone

$R_f$  : Résistance fixe (Réglage optimal de la mesure, 240  $\Omega$ )

$E$  : Source de tension continue (15 V)



**Fig. 2-8 : Montage de mesure de la résistance électrique de la mèche de carbone**

Ce montage est adapté pour les essais statiques pour lesquels l'augmentation de résistance électrique due à la rupture des fibres de la mèches de carbone est mesurée. L'amplitude de l'augmentation de la résistance électrique est en effet assez conséquente ( $> 0,1 \Omega$ ) et la durée des essais est relativement courte ( $< 10$  min. ). Pour des essais plus longs (les essais de fatigue), il est préférable d'utiliser un autre moyen de mesure comme un nano-ohmmètre, car la tension de l'alimentation stabilisée peut dériver dans le temps. De même, l'obtention d'une précision de mesure inférieure au centième d'ohm nécessite l'utilisation d'un nano-ohmmètre.

### 2.2.1.2. Nano-ohmètre

Le nano-ohmètre HP 34420A permet d'effectuer des mesures de résistance en 2 ou 4 fils très précises avec une résolution maximale de  $0,1 \mu\Omega$  et une précision de mesure de  $4 m\Omega$  sur 24 h sur la gamme  $100 \Omega$  (à  $23 \text{ }^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ). Une sortie analogique permet de transmettre la mesure sur la carte d'acquisition.

## 2.2.2. Mesure de l'émission acoustique

### 2.2.2.1. Principes généraux sur l'émission acoustique

L'émission acoustique (E.A.) désigne le phénomène de création d'ondes élastiques transitoires résultant de micro-déplacements locaux internes à un matériau soumis à sollicitation. Deux types d'émissions acoustiques peuvent être distingués : l'émission continue et l'émission discrète. L'émission continue est due à un nombre élevé de petits mécanismes très rapprochés dans le temps (par exemple, déformation plastique des métaux). L'émission discrète ou impulsionnelle est constituée d'événements aléatoires d'énergie importante. Pour les matériaux composites les phénomènes liés à l'endommagement tels que les ruptures de fibres, les fissurations de matrice, les décohésions fibres/matrice sont des générateurs d'émission acoustique discrète. Les signaux d'émission acoustique rencontrés pour les matériaux composites sont donc impulsionnels. Une salve d'émission acoustique appelée aussi événement a une forme sinusoïdale amortie (cf. fig. 2-9). Plusieurs paramètres peuvent être définis afin de caractériser le signal d'E.A. La détection du signal se fait à partir d'une tension seuil, supérieure au bruit de fond, choisie par l'opérateur. Chaque alternance qui dépasse le seuil constitue une impulsion appelée coup. L'amplitude de la salve correspond à la tension crête. La durée de l'événement est le temps mesuré entre le premier et le dernier dépassement de seuil. Le temps de montée est le temps mesuré entre la première alternance et la tension crête. Enfin l'énergie de la salve est représentée par l'aire hachurée sur la figure 2-9.

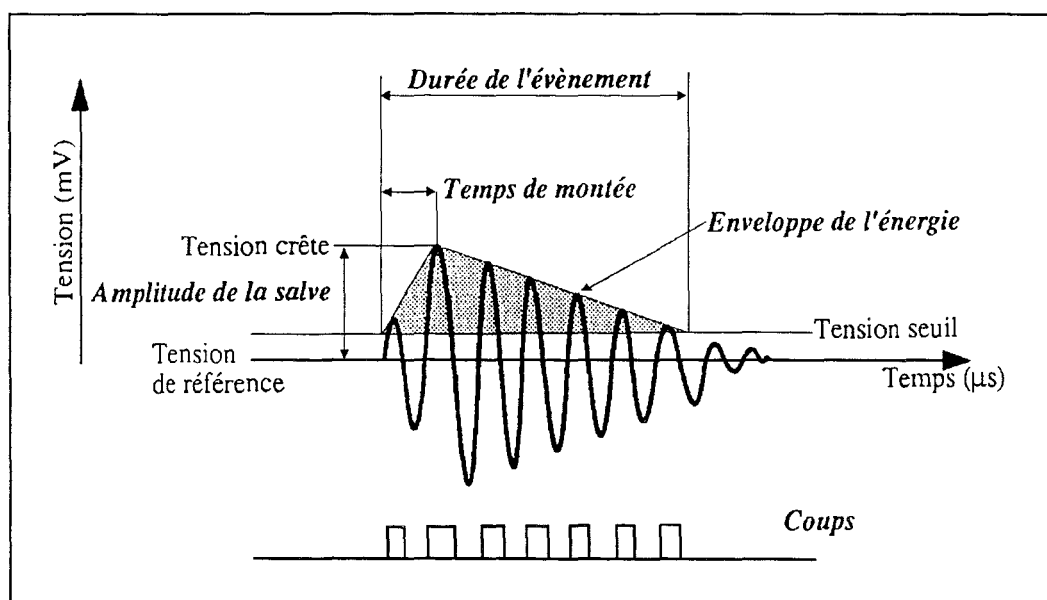


Fig. 2-9 : Schéma d'une salve d'émission acoustique impulsionnelle



A partir de ces différents paramètres deux types d'analyses sont possibles. Un premier traitement est quantitatif et consiste à compter le nombre de salves ou de coups, ce qui permet de connaître l'évolution de l'endommagement du matériau considéré en temps réel. Généralement, on considère le nombre de coups car celui-ci est variable dans une salve et une salve d'énergie importante (avec un nombre de coups important) représente un dommage plus important qu'une salve de faible énergie. Le second traitement est statistique et s'effectue principalement sur quatre paramètres de la salve : l'amplitude, l'énergie, la durée et le nombre de coups par salve. Ces quatre paramètres sont analysés en terme de distribution et permettent dans certains cas de remonter à la nature du phénomène qui génère le signal d'émission acoustique. Cependant dans le cas des matériaux composites, il semble difficile d'énoncer des règles générales concernant l'interprétation des grandeurs caractéristiques de l'E.A, car des résultats divergents sont trouvés d'un auteur à l'autre. Le paramètre le plus utilisé reste l'amplitude de la salve qui est la seule caractéristique qui ne dépende pas de paramètres fixés par l'opérateur. Le plus souvent, les salves de forte amplitude sont attribuées aux ruptures de fibres, celles d'amplitude moyenne aux délaminages et les événements de faible amplitude aux fissurations de la matrice [50, 51, 52].

### 2.2.2.2. Principe de mesure

Le principe de l'émission acoustique repose sur la détection des ondes élastiques transitoires générées par la déformation soudaine d'un matériau sous contrainte. Ces ondes se propagent au sein du matériau, de la source (microfissure) vers le capteur, par l'intermédiaire duquel elles sont transformées en signaux électriques, enregistrées, filtrées et traitées par la chaîne d'émission acoustique. L'équipement d'émission acoustique (LOCAN AT de Physical Acoustics Corporation) utilisé ici, comporte un capteur piézo-électrique 200 kHz, un préamplificateur (gain 40 dB, filtre 100-300 kHz) et une station d'acquisition. Des gains à 20 dB et des seuils à 68 dB ont été retenus sur la base de l'expérience acquise antérieurement sur des matériaux analogues [53].

L'utilisation de l'émission acoustique en parallèle avec les mesures de résistance électrique de la mèche de carbone permet de comparer ce nouveau moyen de contrôle de l'endommagement du matériau avec une méthode de contrôle non destructive classique. La figure 2-10 précise la position du capteur d'émission acoustique sur l'éprouvette.

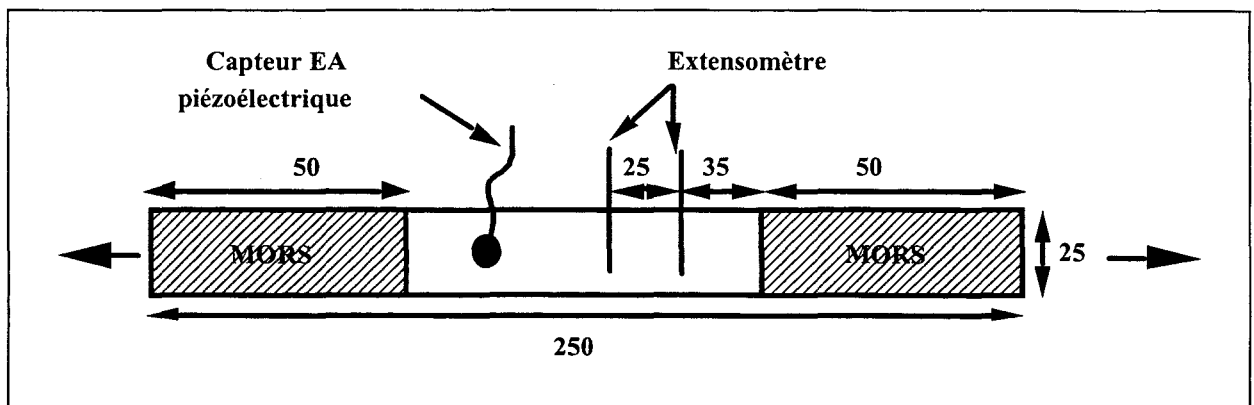


Fig. 2-10 : Position du capteur d'émission acoustique

### 2.2.3. Essais de traction

Les éprouvettes sont sollicitées en traction suivant l'axe de la mèche de carbone servant de capteur d'endommagement à une vitesse de 1 mm/min. Le dynamomètre utilisé est un dynamomètre ZWICK 1474 équipé d'une cellule de force 100 KN et d'un extensomètre ( $L_0 = 25$  mm). A partir du montage expérimental réalisé, il est possible de mesurer simultanément : la force appliquée sur l'éprouvette par le capteur de force, la déformation de l'éprouvette grâce à l'extensomètre, le nombre de coups cumulés d'émission acoustique et la résistance électrique de la mèche de carbone. Ces données sont transférées sur un ordinateur d'acquisition, par l'intermédiaire d'une carte d'interface qui assure la liaison entre les instruments de mesure et l'ordinateur. Les essais sont réalisés en atmosphère normalisée ( $23\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  et  $50\% \pm 5\%$ ).

### 2.2.4. Essais de flexion

Les éprouvettes sont sollicitées en flexion trois points au moyen d'un dynamomètre INSTRON 1185 équipé d'une cellule de force de 5 KN, à une vitesse de 2 mm/min. (cf. fig. 2-11). La distance entre appuis ( $L$ ) est égale à 20 fois l'épaisseur ( $e$ ) de l'éprouvette.

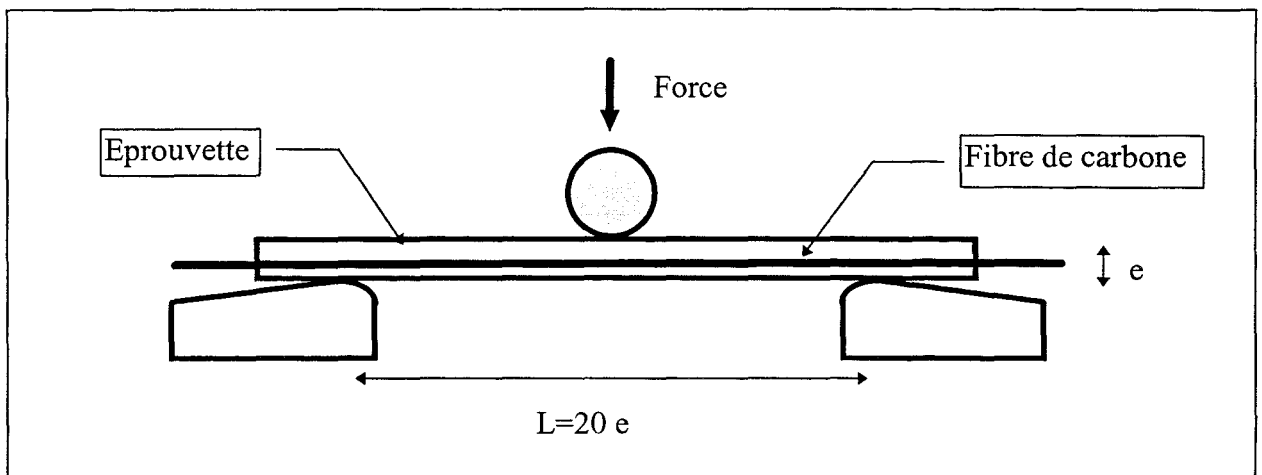


Fig. 2-11 : Principe de la flexion trois points

Le système d'acquisition est le même que celui utilisé pour les expériences de traction et des mesures d'émission acoustique sont réalisées à chaque essai.

Le dynamomètre donne les valeurs de la force ( $F$ ) exercée sur l'éprouvette ainsi que sa flèche ( $f$ ) en milieu de portée. A partir de la force, la contrainte en flexion peut être déterminée par la relation suivante :

$$\sigma = \frac{M}{I} \quad (2-2)$$

où  $M$  est le moment fléchissant et  $I$  le module d'inertie de la section droite.

$$\text{avec } M = \frac{FL}{4} \quad \text{et} \quad I = \frac{b e^2}{6} \quad (b : \text{largeur de l'éprouvette})$$

d'où

$$\sigma = \frac{3 F L}{2 b e^2} \quad (2-3)$$

A partir de la flèche de l'éprouvette, l'allongement en fibre tendue ( $\varepsilon$ ) correspondant aux fibres de carbone peut être trouvé par l'application de la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{6 e_f f}{L^2} \quad (2-4)$$

Dans notre cas  $e_f$  correspond à la distance entre le haut de l'éprouvette et la position de la fibre de carbone. Nous pouvons donc obtenir des courbes contrainte/déformation comme pour les essais de traction.

## 2.2.5. Essais de cisaillement

Les essais de délaminage sont effectués en flexion trois points sur appuis rapprochés avec une machine de traction INSTRON 1185. La portée de l'éprouvette est réglée à 20 mm, i.e. 5 fois son épaisseur. Les dimensions des éprouvettes sont ici de 4 mm x 13 mm x 24 mm. La vitesse de l'essai est fixée à 1 mm/min. La valeur de la contrainte de cisaillement  $\tau$  est alors donnée par la formule suivante :

$$\tau = \frac{3 F}{4 b h} \quad (2-5)$$

où F est la force appliquée, b la largeur et h l'épaisseur de l'éprouvette

## 2.2.6. Essais de fatigue

### 2.2.6.1. Essais de fatigue à amplitude de flèche constante en flexion trois points

La machine d'essai utilisée (cf. fig. 2-12), permet d'exercer sur l'éprouvette une flèche périodique à amplitude maximale constante grâce à un système hydraulique, entraînant une bielle excentrique solidaire de la panne centrale. La force exercée sur l'éprouvette est mesurée par un capteur d'effort relié à un amplificateur puis à un système d'acquisition. Un programme d'acquisition spécialement adapté aux essais de fatigue a été développé. Celui-ci permet de faire l'acquisition simultanée de la contrainte maximale appliquée lors d'un cycle, du temps correspondant (ce qui permet de déterminer le nombre de cycles effectués) et des résistances électriques maximales et minimales de la mèche de carbone sur le cycle.

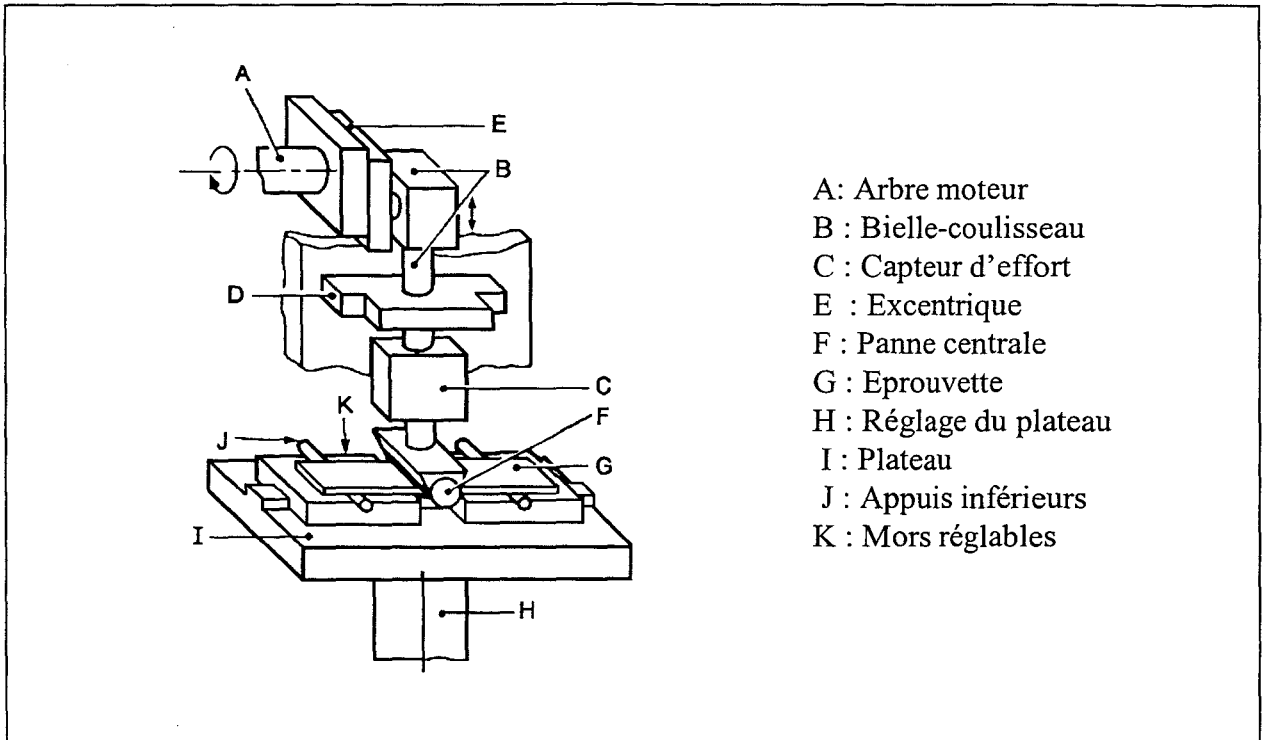


Fig. 2-12 : Schéma de la machine d'essai de fatigue

La fréquence de sollicitation est de 1 Hz. La distance entre appuis est prise à vingt fois l'épaisseur de l'éprouvette comme le préconisent les normes de fatigue (NF T 51-120-3) pour des composites à renfort fibre de verre. Le cycle de contrainte imposé à l'éprouvette est du type contrainte répétée, c'est à dire que la contrainte minimale est nulle (cf. fig. 2-13).

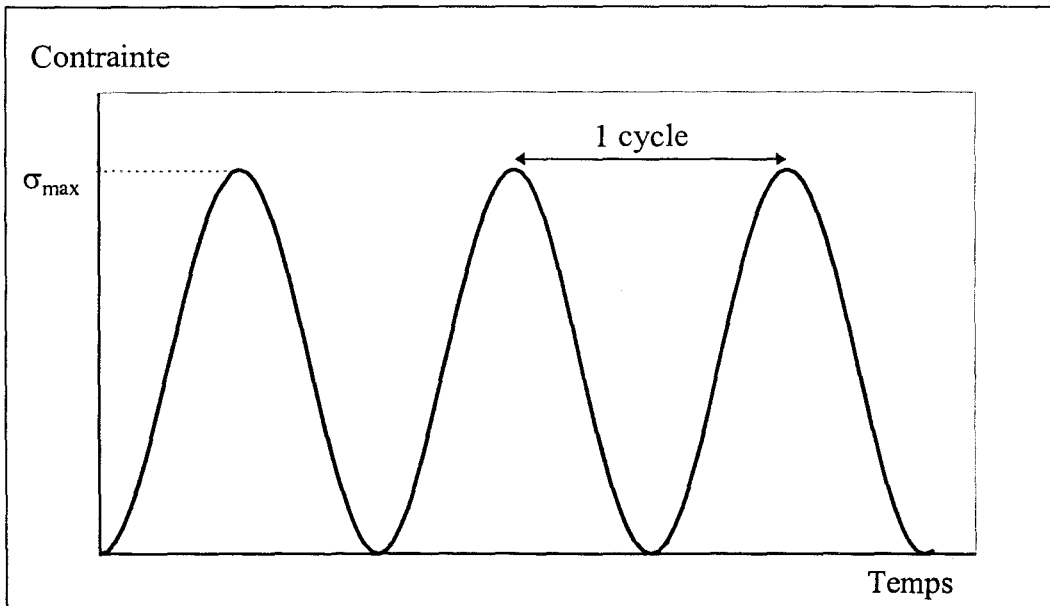


Fig. 2-13 : Cycle de contrainte

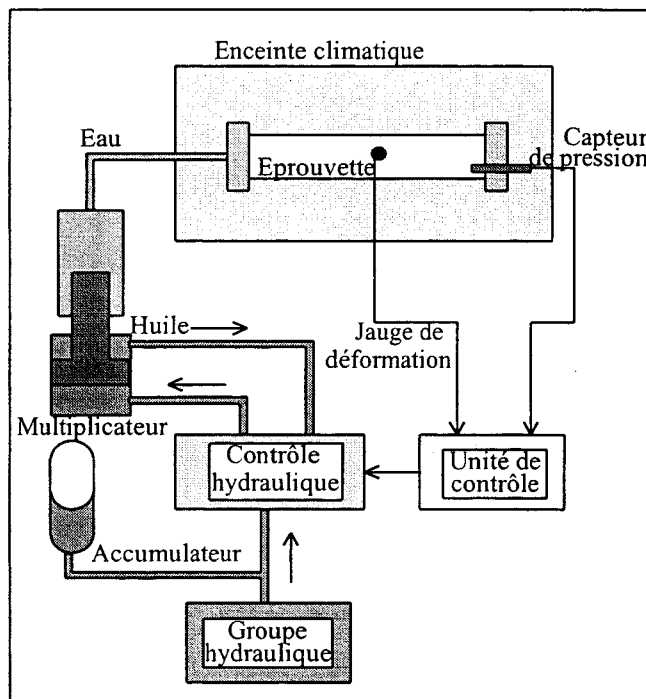
### 2.2.6.2. Essais de fatigue à amplitude de contrainte constante en traction

Ces essais sont effectués à l'aide d'un dynamomètre ZWICK 1474 qui permet d'imposer des cycles de contrainte entre deux bornes préalablement établies. La contrainte imposée variant entre une valeur nulle et la valeur maximale, l'éprouvette subit donc uniquement des contraintes de traction et n'est jamais en compression. La vitesse de la traverse est fixée à 200 mm/min. La fréquence est variable en fonction de la contrainte maximale imposée (entre 0,4 et 0,7 Hz). La déformation de l'éprouvette est mesurée grâce à un extensomètre.

### 2.2.7. Essais sur tubes

#### 2.2.7.1. Essai instantané sous pression interne croissante

Il s'agit ici d'appliquer à un tube une pression interne croissante jusqu'à perlage (perte d'étanchéité par apparition de gouttelettes d'eau réparties uniformément sur la paroi) ou éclatement. Le principe de la machine hydraulique utilisée pour appliquer la pression interne est présenté sur la figure 2-14.



**Fig. 2-14 : Schéma du dispositif expérimental d'essai en pression interne monotone**

La machine hydraulique utilisée est principalement composée :

- d'un groupe motopompe de 11 kW produisant une pression maximale de 250 Bars dans le circuit d'huile
- d'un accumulateur

- d'un multiplicateur transfert assurant le transfert de pression huile-eau (les tubes étant pressurisés à l'eau) et permettant de quadrupler la puissance de la motopompe
- d'une servovalve assurant le pilotage de la mise en pression.

La pression fournie par le groupe hydraulique est envoyée par l'intermédiaire du multiplicateur transfert dans le tube. La vitesse de pressurisation est imposée au moyen d'un automate programmable qui commande la servovalve. Pour les essais monotones, la rampe de montée en pression est fixée à 20 Bar/min. La pression est déterminée par un capteur de pression situé en sortie du tube. Les déformations axiales et circonférentielles du tube sont mesurées par des jauges d'extensométrie collées au centre de l'éprouvette. En général deux rosettes, constituées chacune par deux grilles perpendiculaires, sont utilisées.

La détection du perlage est réalisée par une méthode électrique. Le tube est pour cela recouvert d'une peinture graphite conductrice. La résistance électrique est alors mesurée pendant l'essai entre l'intérieur du tube et l'extérieur, les deux électrodes étant constituées respectivement par le bouchon d'étanchéité et la peinture graphite. Tant que le tube reste étanche, la résistance électrique est infinie, par contre, lors du perlage, l'eau contenue dans le tube passe à sa surface par les microfissures, ce qui entraîne la fermeture du circuit électrique d'où la chute de la résistance électrique.

Toutes les mesures effectuées sont transférées dans une centrale d'acquisition H.P. 3852 et stockées en vue de leur traitement.

### **2.2.7.2. Essai en fatigue dynamique sous pression interne**

Les essais de cyclage sont effectués au moyen d'un banc de test hydraulique (cf. fig. 2-15) comportant :

- un groupe motopompe (90 kW)
- une vanne proportionnelle
- un système de commande proportionnelle informatisé
- un multiplicateur transfert (huile-eau)
- un caisson de conditionnement thermique

L'équipement utilisé permet de tester simultanément quatre tubes au même niveau de pression. L'originalité de cette installation réside dans le fait que le groupe hydraulique n'alimente que deux multiplicateurs en va-et-vient. Les tubes sont ainsi pressurisés en opposition de phase deux à deux. L'utilisation d'un tel système permet d'atteindre une pression maximale de 400 Bars avec une centrale hydraulique de puissance réduite. Le pilotage de cet essai est réalisé au moyen d'un automate programmable gérant la pression et la fréquence d'essai. La fréquence de sollicitation est prise à 25 cycles/min. Celle-ci est choisie conformément aux normalisations existantes concernant la qualification de canalisations (ASTM 2992 procédure A). Lorsque le perlage apparaît sur un tube, celui-ci est automatiquement isolé par l'intermédiaire d'une électrovanne, permettant la poursuite de l'essai sur les autres tubes.

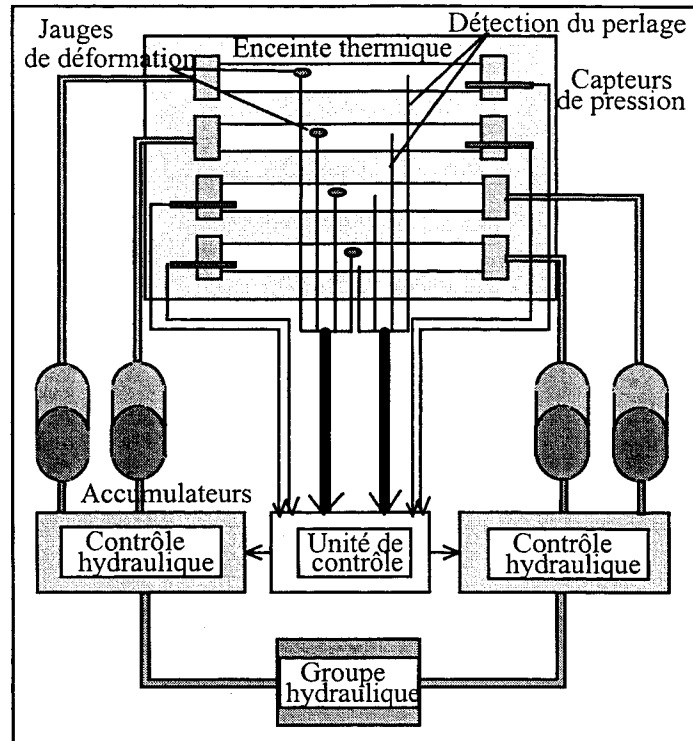


Fig. 2-15 : Schéma du dispositif expérimental d'essais dynamiques sous pression interne

**CHAPITRE III :**  
**VALIDATION DU CAPTEUR**  
**SUR EPROUVETTES**



# CHAPITRE III :

## VALIDATION DU CAPTEUR SUR EPROUVETTES

L'objectif est ici de déterminer et d'analyser la réponse des capteurs d'endommagement résistifs choisis pour différents types de sollicitations sur éprouvettes. Pour cela plusieurs essais mécaniques sont mis en oeuvre : traction, flexion, cisaillement, chargement croissant répété et chargement dynamique. La fonction de ces capteurs est de détecter "au mieux" les taux d'allongement subis par le matériau hôte et de déclencher un éventuel système d'alarme dès que le taux d'allongement maximum enregistré dépasse le seuil d'endommagement du matériau hôte.

### 3.1. Validation du capteur en traction monoaxiale monotone

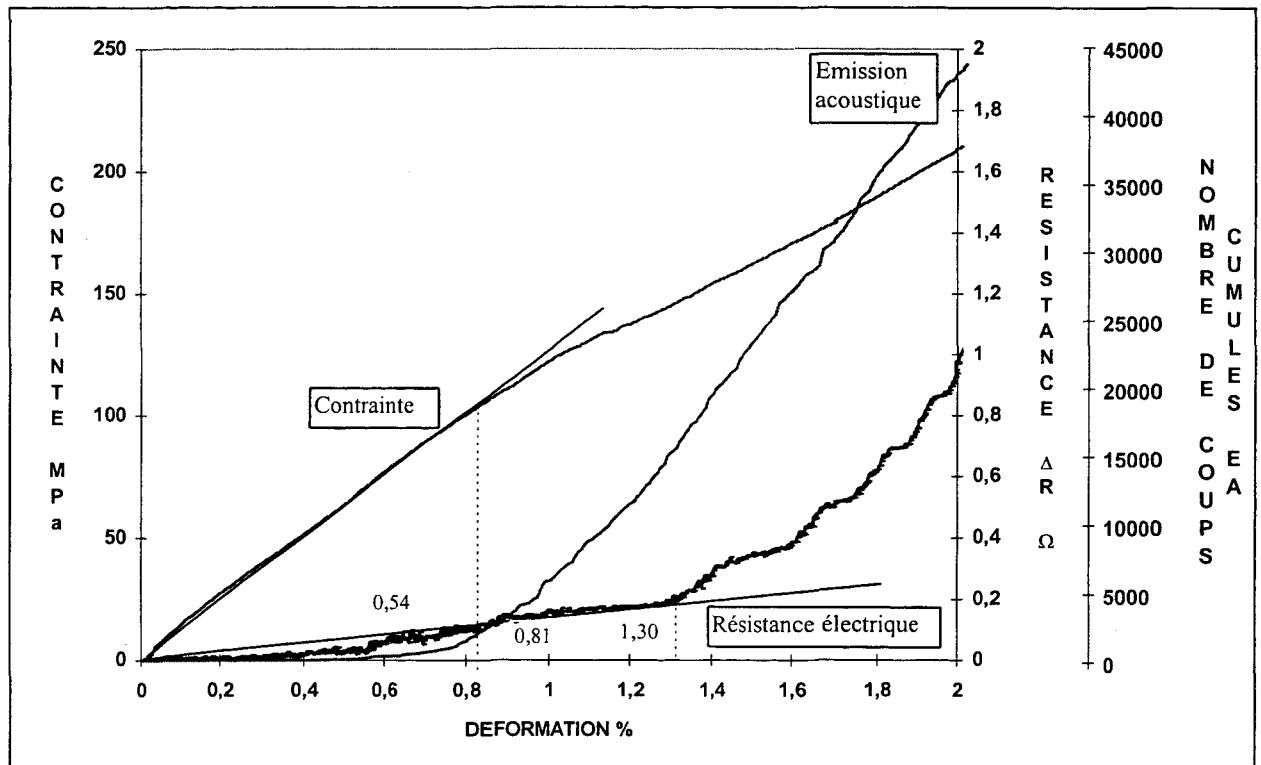
La phase de validation consiste tout d'abord à vérifier la faisabilité du capteur, c'est à dire si une sollicitation provoquant un endommagement de l'éprouvette composite entraîne dans le même temps une variation de la résistance électrique du capteur. La reproductibilité des réponses électriques des capteurs est ensuite analysée ainsi que l'influence des caractéristiques physiques des mèches de carbone sur leur comportement électrique, afin de définir les possibilités et les conditions d'utilisation des mèches de carbone dans leur rôle de capteur d'endommagement.

#### 3.1.1. Faisabilité : essai avec des mèches de carbone d'allongement à la rupture 2,1 %

La figure 3-1 présente les résultats obtenus lors d'un essai de traction statique sur une éprouvette 0/90° comportant une fibre de carbone d'allongement à la rupture nominal de 2,1 %. Trois courbes sont relevées : la courbe contrainte/déformation, la courbe écart de résistance électrique/déformation (l'écart de résistance électrique  $\Delta R$  représente la résistance électrique mesurée moins la résistance électrique initiale avant mise sous contrainte) et la courbe d'émission acoustique (nombre de coups cumulés en fonction de la déformation).

La courbe de résistance électrique de la mèche de carbone en fonction de la déformation met en évidence une augmentation de  $0,33 \Omega$  pour 1,5 % de déformation. On peut remarquer que même pour les très faibles déformations, la pente de la courbe de la résistance électrique n'est pas nulle, ce qui provient probablement de l'élongation des fibres de carbone qui entraîne l'augmentation de la longueur des fibres, une réduction de leur section et par conséquent un accroissement de la résistance électrique. Pour des déformations plus importantes, des segments de courbe avec une pente plus accentuée sont visibles, qui peuvent être reliés aux premières ruptures des fibres de carbone.

La fin de linéarité des différentes courbes a été relevée. Pour la courbe contrainte/déformation, le changement de pente à 0,81 % de déformation (coude) correspond à la fin du régime de déformation élastique et peut être associé au début de l'endommagement global irréversible du matériau. La courbe d'émission acoustique, reflet du même endommagement global du matériau, décolle pour une déformation de 0,54 % correspondant à l'amorçage des premières microfissures et présente une discontinuité de pente très accentuée pour une déformation de 0,78 % pratiquement analogue à la limite de linéarité mécanique. Pour la courbe de la résistance électrique, un premier changement de pente s'effectue à 1,30 % de déformation. Ce changement de pente constitue un signal significatif du capteur qui peut être facilement détecté.



**Fig. 3-1: Courbes obtenues avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 2,1 % sur une éprouvette 0/90°**

Pour vérifier l'état d'endommagement de l'éprouvette des photographies sont réalisées à la loupe binoculaire (à un grossissement de 7) à différents stades d'endommagement (cf. fig. 3-2, fig. 3-3). Avant le coude, c'est à dire avant le changement de pente de la courbe contrainte/déformation, le cliché 3-2 montre qu'il n'y a pas d'endommagement visible du matériau. Après le coude de la courbe contrainte/déformation, la photographie 3-3 met en évidence la formation de nombreuses fissures transverses dans la matrice qui apparaissent sous forme de traits blancs. Ces observations montrent ainsi que le changement de pente de la courbe contrainte/déformation est bien lié à l'endommagement du matériau par fissuration transverse, ce que confirme par ailleurs le décolllement de la courbe d'émission acoustique. Ces premiers essais montrent la faisabilité de la méthode de suivi de l'endommagement choisie dans la mesure où la réponse du capteur (mèche de carbone) présente une amplitude significative, lors de l'endommagement du matériau.

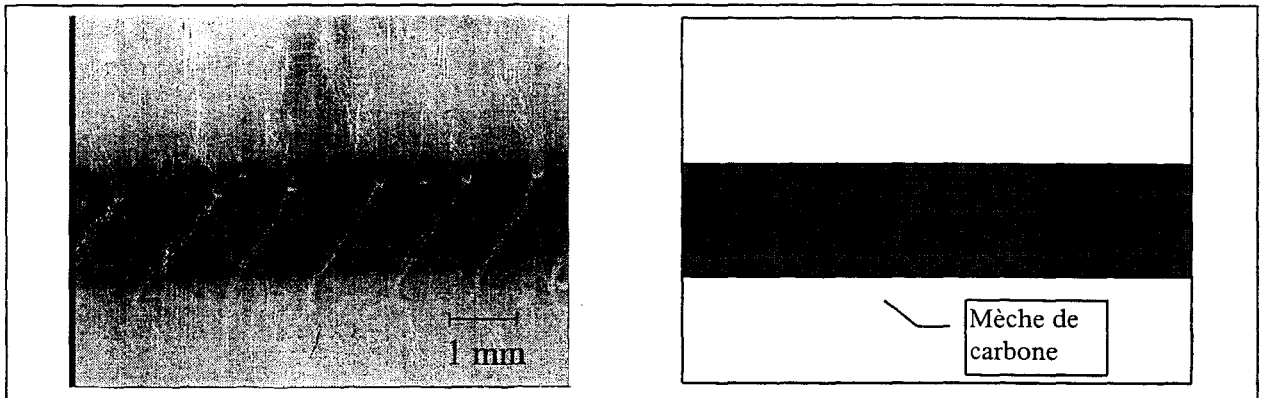


Fig. 3-2: Eprouvette 0/90° avant le coude de la loi de comportement  $\sigma$ - $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 0,7 \%$ )

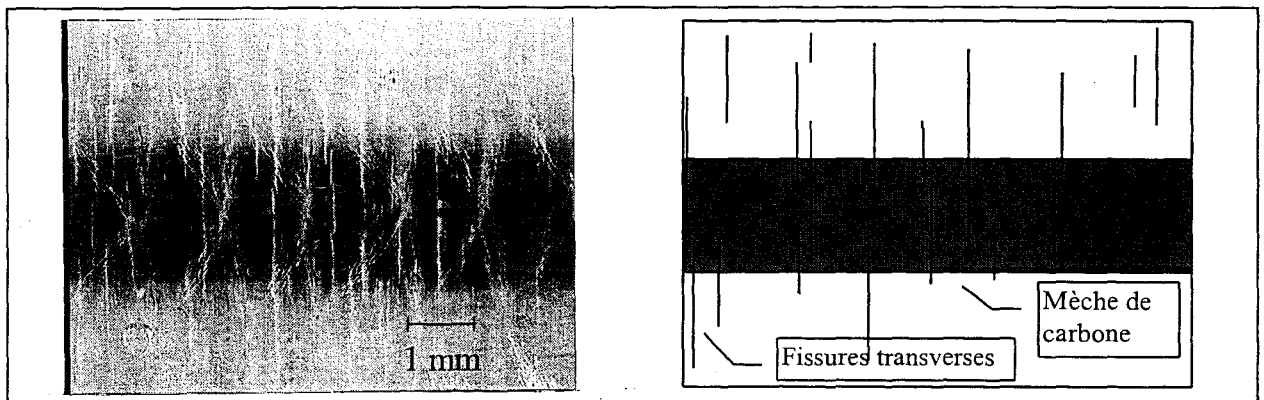


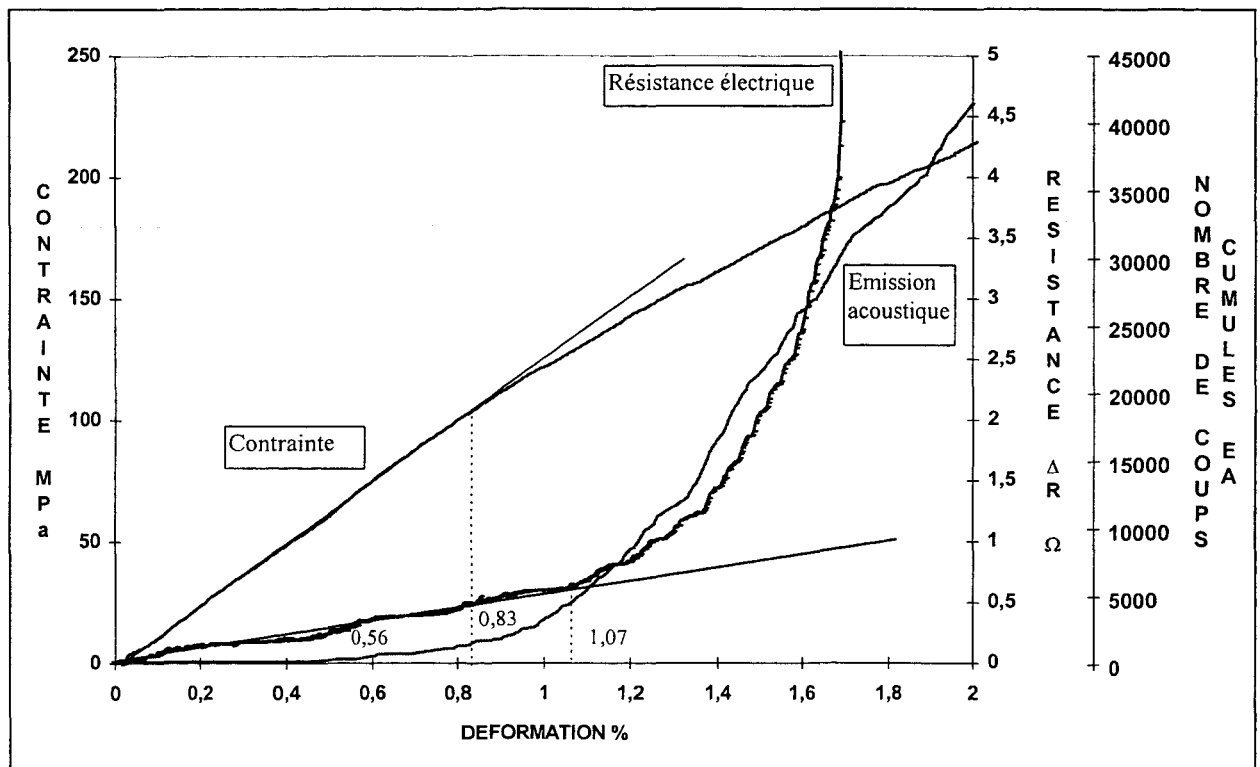
Fig. 3-3: Eprouvette 0/90° après le coude de la loi de comportement  $\sigma$ - $\varepsilon$  ( $\varepsilon = 1,2 \%$ )

Cependant, la fin de linéarité de la pente de la courbe résistance électrique/déformation s'effectue à 1,30 % de déformation, soit bien avant la ruine complète du matériau qui a lieu à 2,46 % de déformation, mais après la fin du régime élastique et les premiers endommagements irréversibles du matériau. Cela s'explique par le fait que le changement de résistance électrique n'est sensible qu'à l'endommagement propre des fibres de carbone du capteur qui peut intervenir plus tardivement que l'endommagement du matériau hôte. Pour optimiser le capteur intégré, il conviendrait plutôt d'utiliser des mèches de carbone telles que le changement de pente de la courbe résistance électrique/déformation ait lieu avant la fin du régime élastique du matériau hôte (visualisée par le coude de sa loi de comportement mécanique). Les mèches de carbone d'allongement à la rupture de 2,1 % ne paraissent donc pas avoir une sensibilité suffisante pour jouer le rôle de capteur d'endommagement préventif pour le matériau choisi.

### 3.1.2. Comparaison des réponses de mèches de carbone d'allongements à la rupture différents

Les mèches de carbone utilisées possèdent des allongements à la rupture respectifs de 2,1 %, 1,5/1,7 %, 0,6 % et 0,36 %. Elles sont toutes intégrées dans des éprouvettes à renfort fibres de verre 0/90°.

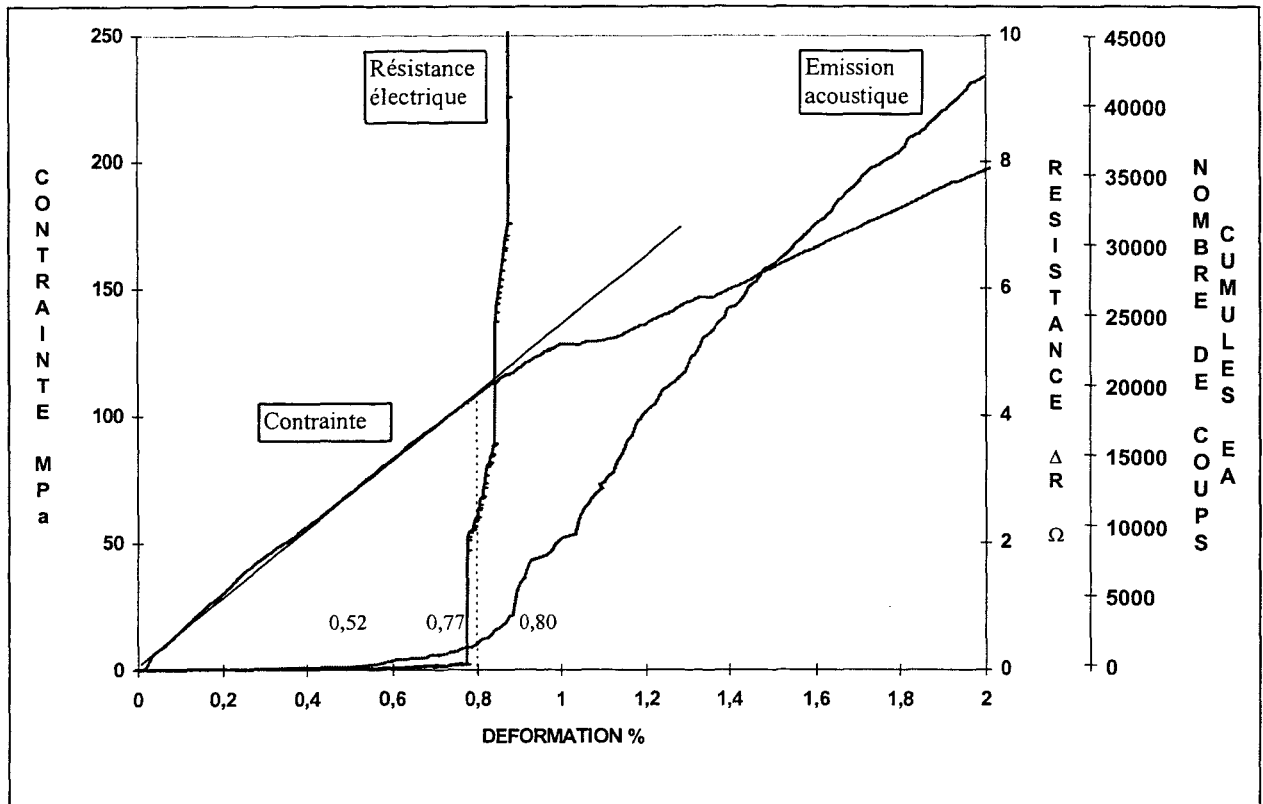
#### 3.1.2.1. Mèche d'allongement à la rupture 1,5/1,7 %



**Fig. 3-4 : Courbes obtenues avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 1,5/1,7 % sur une éprouvette 0/90°**

Dans un premier temps, la démarche et la méthodologie expérimentales précédemment mises en oeuvre sur le composite instrumenté de fibres de carbone 2,1 % sont appliquées avec les fibres de carbone 1,5/1,7 %. La figure 3-4 représente les trois courbes obtenues : contrainte/déformation, résistance électrique/déformation et courbe d'émission acoustique. On constate que la variation de résistance électrique en fonction de la déformation est plus importante, variation de 1,62  $\Omega$  pour une déformation de 1,5 %. Le changement de pente de la courbe contrainte/déformation s'effectue à 0,83 % de déformation et celle de l'émission acoustique à 0,56 % de déformation, soit pratiquement pour les mêmes valeurs que pour l'éprouvette instrumentée avec les mèches d'allongement à la rupture de 2,1 %. En revanche le changement de pente de la courbe résistance électrique/déformation s'effectue pour une déformation de 1,07 %, donc pour une déformation plus faible que pour la mèche de carbone précédente.

### 3.1.2.2. Mèche d'allongement à la rupture 0,6 %



**Fig. 3-5 : Courbes obtenues avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 % sur une éprouvette 0/90°**

De la même manière, trois courbes sont obtenues pour une éprouvette instrumentée avec une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 % (cf. fig. 3-5). Pour une déformation de 1,5 %, la variation de résistance électrique est beaucoup plus importante : 227,6 Ω. Les changements de pente de la courbe contrainte/déformation et de la courbe émission acoustique ont lieu pour des déformations approximativement similaires aux cas précédents, respectivement à 0,80 % et 0,52 % de déformation. En revanche le changement de pente de la courbe de la résistance électrique se fait pour une déformation plus faible à 0,77 %, soit avant la fin du régime élastique du matériau. Ce capteur, bien que moins sensible que l'émission acoustique paraît donc mieux adapté au matériau étudié. En effet, le changement de pente de la courbe résistance électrique/déformation arrive avant celui de la courbe contrainte/déformation, donc avant la fin du régime élastique du matériau. La mèche de carbone casse soudainement, ce qui explique les perturbations visibles au niveau de la courbe contrainte/déformation et le changement de pente de la courbe de résistance électrique beaucoup plus brusque que pour les deux mèches de carbone précédentes. De plus, le fait que les changements de pente des courbes contrainte/déformation et émission acoustique/déformation restent pratiquement identiques montre que la nature du capteur utilisé ne perturbe que faiblement la phase d'initiation de l'endommagement du matériau hôte.

### 3.1.2.3. Mèche d'allongement à la rupture 0,36 %

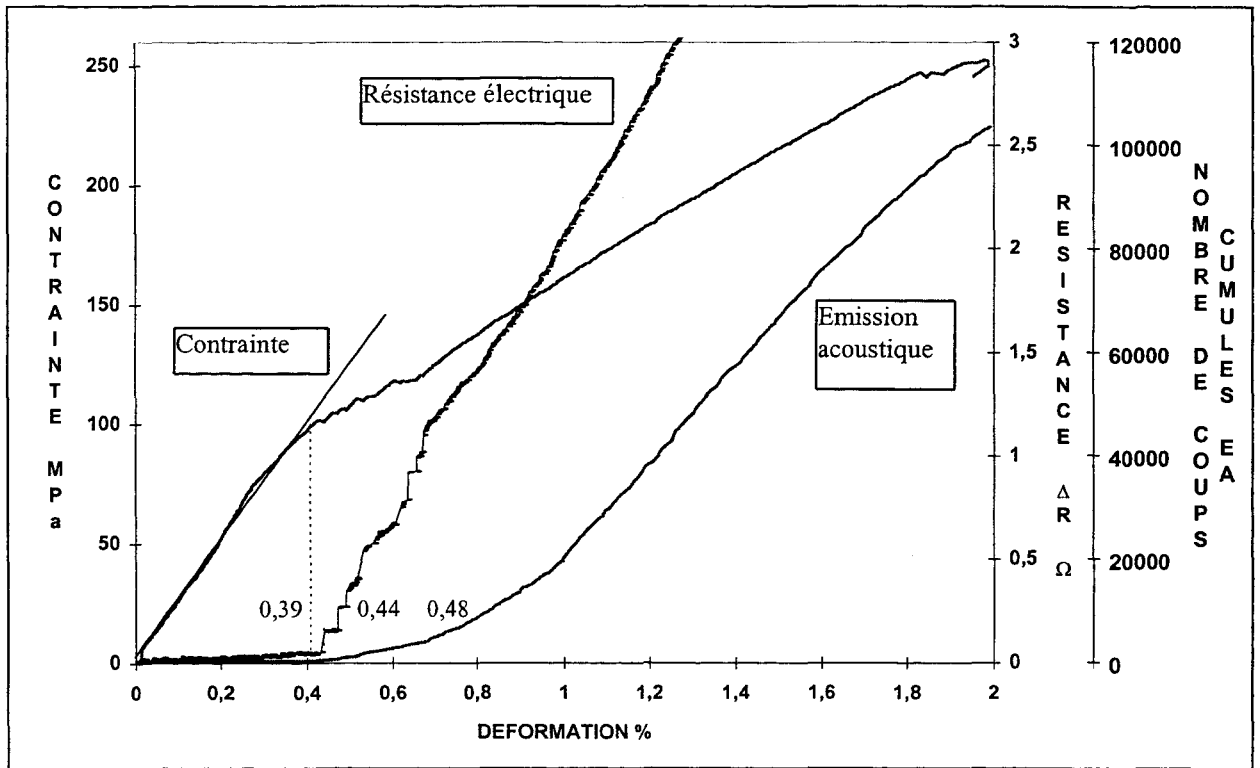
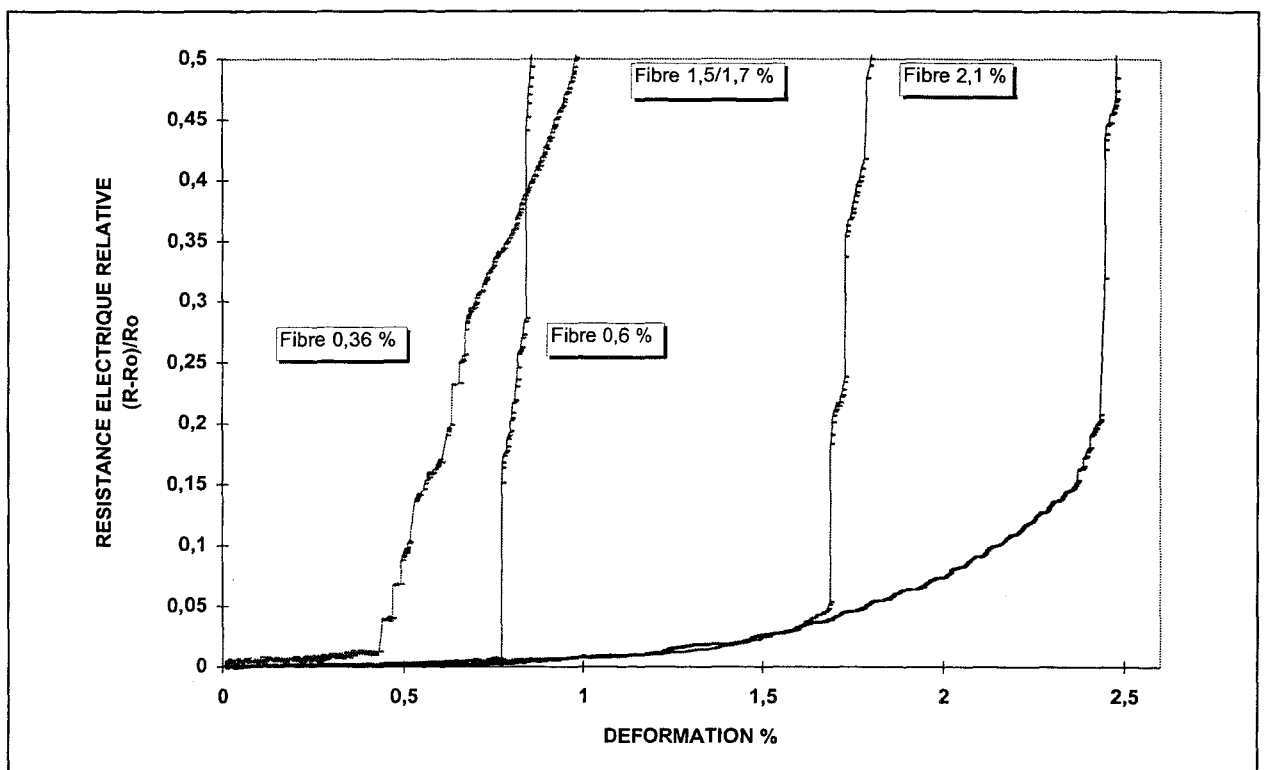


Fig. 3-6 : Courbes obtenues avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 0,36 % sur une éprouvette 0/90°

La figure 3-6 présente les courbes obtenues avec une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,36 %. Le changement de pente de la courbe contrainte/déformation s'effectue pour une déformation de 0,39 %, valeur plus faible que dans les cas précédents cependant, cette fin de linéarité est principalement due aux ruptures des fibres de carbone du capteur. En effet la fin de linéarité de la courbe de résistance électrique intervient juste après pour une valeur de 0,44 %. La courbe d'émission acoustique décolle pour une déformation de 0,48 % avec les premières ruptures des filaments de la mèche de carbone. Le fait que la rupture des fibres de carbone perturbe fortement la loi de comportement du matériau verre/résine s'explique car il s'agit ici de fibres de carbone de haut module (790 GPa) dont la rigidité contribue fortement à celle du composite hôte alors que les fibres de carbone précédentes possédaient un module bien moindre (< 400 GPa), (cf. tab. 2-1). Le capteur utilisé apparaît bien adapté au matériau étudié. En effet, le changement de pente de la courbe résistance électrique/déformation qui constitue un signal du capteur facilement identifiable en temps réel, apparaît en même temps que la réponse de la courbe d'émission acoustique, donc avant les premiers endommagements irréversibles du matériau hôte. Ce signal préventif permet donc de savoir que le seuil de contrainte critique, après lequel le matériau est endommagé de façon irréversible sera bientôt dépassé si la contrainte appliquée continue de croître.

### 3.1.2.4. Analyse comparée

Sur la figure 3-7 sont regroupées les courbes résistance électrique/déformation présentées précédemment pour les différents types de mèches de carbone. La résistance électrique relative est prise en compte afin d'annuler les effets de la différence de résistance électrique initiale des différentes mèches de carbone. Il apparaît logiquement que plus l'élongation à la rupture de la mèche de carbone est importante plus le seuil où la résistance électrique des fibres de carbone augmente brutalement intervient pour une forte déformation. Ainsi, il serait intéressant pour la réalisation des capteurs, d'utiliser des mèches de carbone d'élongation à la rupture différente afin d'obtenir plusieurs réponses correspondant chacune à la rupture d'une mèche. Il serait ainsi possible d'encadrer la valeur de la déformation éventuellement subie par le matériau.



**Fig. 3-7 : Comparaison des courbes obtenues pour différentes mèches de carbone sur des éprouvettes 0/90°**

On peut aussi noter que l'augmentation brusque de la résistance électrique intervient pour des allongements qui correspondent ou sont supérieurs aux allongements à la rupture nominaux fournis par les fiches techniques des producteurs. Ceci indique que les capteurs résistifs ne sont pas fragilisés lors des opérations de manipulation et d'intégration dans le composite verre/résine durant la fabrication des éprouvettes.

### 3.1.3. Analyse des différentes contributions causant l'augmentation de résistance électrique

Pour expliquer l'augmentation de la résistance électrique précédemment constatée, nous pouvons faire l'hypothèse que deux phénomènes interviennent. Le premier est l'élongation des fibres qui intervient dès la mise en charge de l'éprouvette. Le deuxième correspond à la rupture des fibres qui intervient à partir d'une limite de déformation dépendant de l'allongement à la rupture de la mèche de carbone considérée. Afin de vérifier ces hypothèses, l'effet des différentes contributions est ici analysé et comparé aux résultats expérimentaux.

#### 3.1.3.1. Contribution due à l'élongation des fibres

##### 3.1.3.1.1. Calcul de la résistance électrique due à l'élongation

L'élongation des fibres de carbone entraîne une augmentation de la longueur des fibres, une diminution de leur section et donc une augmentation de leur résistance électrique d'après l'équation suivante :

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad (1-23)$$

où R est la résistance électrique ( $\Omega$ ),  $\rho$  la résistivité ( $\Omega.m$ ), L la longueur de la mèche de carbone (m) et S sa section ( $m^2$ ).

L'équation (1-23) peut se réécrire :

$$R = \rho \frac{l_1}{l_2 l_3} \quad (3-1)$$

avec  $l_1$ : longueur de la mèche correspondant au sens d'étirement de l'éprouvette  
 $l_2$ : largeur de la mèche de carbone (somme des diamètres des fibres composant la mèche)  
 $l_3$ : épaisseur de la mèche de carbone

d'où

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l_1}{l_1} - \frac{\Delta l_2}{l_2} - \frac{\Delta l_3}{l_3} \quad (3-2)$$

La contribution de l'élongation de la mèche de carbone peut être calculée en prenant l'hypothèse que les fibres de carbone subissent la même déformation que le composite. L'éprouvette subit une traction monoaxiale, en prenant en compte le coefficient de Poisson, il vient alors :



$$\frac{\Delta l_2}{l_2} = \frac{\Delta l_3}{l_3} = -\nu \frac{\Delta l_1}{l_1} = -\nu \varepsilon_{11} \quad (3-3)$$

avec  $\nu$  : coefficient de Poisson des fibres de carbone, estimé à 0,32 % d'après la littérature [54].  
 $\varepsilon_{11}$  : déformation suivant le sens d'élongation de l'éprouvette

L'équation (3-3) se réécrit donc

$$\Delta R_e = R_0 \varepsilon (1+2\nu) \quad (3-4)$$

avec  $\Delta R_e$  : variation de la résistance électrique due à l'élongation des fibres  
 $\varepsilon$  : déformation du matériau  
 $R_0$  : résistance électrique initiale de la partie de la mèche de carbone qui subit l'élongation (résistance effective)

Suivant cette équation, l'augmentation de résistance électrique due à l'élongation des fibres s'apparente donc à une droite.

### 3.1.3.1.2. Comparaison calcul/expérience

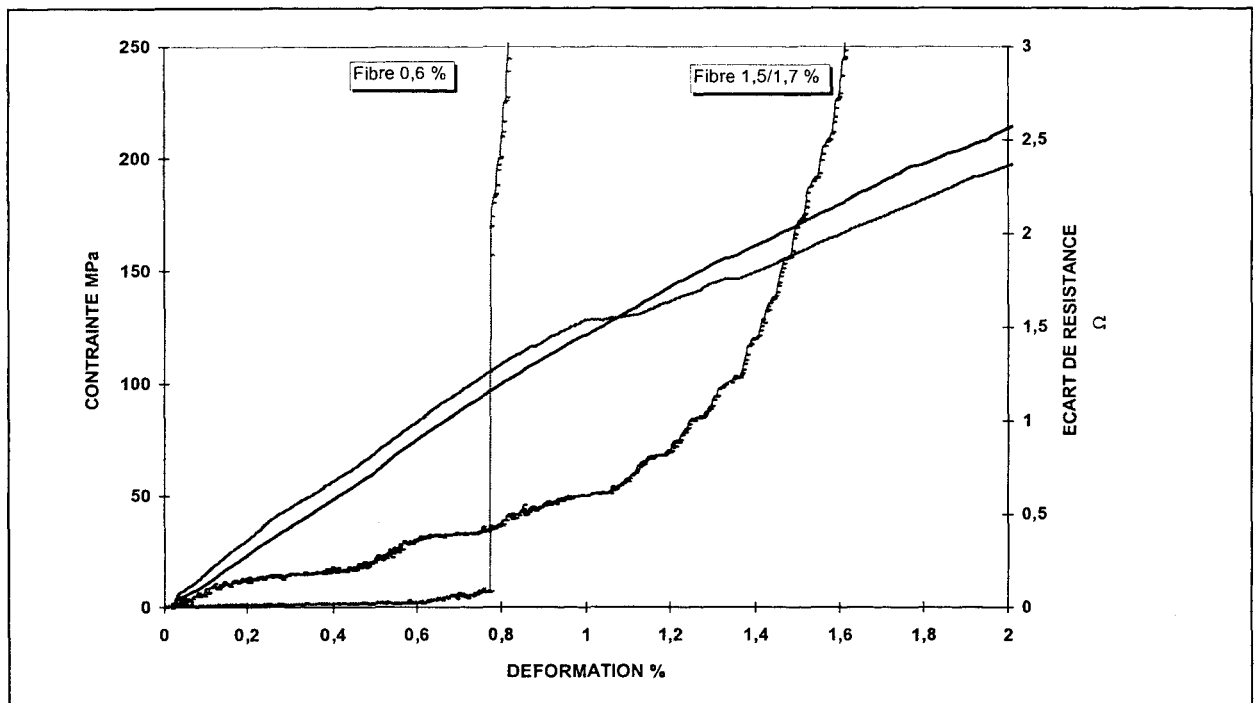
Les valeurs de la variation de résistance électrique sont calculées d'après l'équation (3-4) et comparées aux valeurs de variations de résistances expérimentales trouvées pour les différents types de mèche de carbone (les éprouvettes utilisées sont celles correspondant aux courbes des figures 3-1, 3-4 et 3-5). Les résultats sont présentés dans le tableau 3-1.

Type de capteur	Fibre de carbone d'allongement à la rupture					
	2,1 % Titre : 12 K		1,5/1,7 % Titre : 3 K		0,6 % Titre : 12 K	
Allongement appliqué au composite	Contribution élongation calculée (Ω)	Augmentation de résistance expérimentale (Ω)	Contribution élongation calculée (Ω)	Augmentation de résistance expérimentale (Ω)	Contribution élongation calculée (Ω)	Augmentation de résistance expérimentale (Ω)
0,25 %	0,02	0,01	0,11	0,16	0,01	0,01
0,5 %	0,05	0,04	0,22	0,25	0,03	0,02
1 %	0,10	0,16	0,44	0,59	0,06	42,53
1,5 %	0,15	0,34	0,65	2,07	0,09	241,39
2 %	0,20	0,93	0,87	75,90	0,12	1200,38

**Tableau 3-1 : Comparaison entre la variation de résistance électrique calculée due à l'élongation et l'augmentation de résistance expérimentale**

En comparant les résultats calculés avec les résultats expérimentaux, on constate que lorsque l'on se situe avant le changement de pente des courbes résistance électrique/déformation, les valeurs expérimentales sont très proches de celles calculées. En revanche, après le changement de pente, l'augmentation de la résistance électrique expérimentale est nettement plus importante que celle calculée pour l'élongation. Cela conduit à penser qu'avant le changement de pente de la courbe résistance électrique/déformation un seul phénomène intervient : celui de l'élongation des fibres. Au-delà s'ajoute le deuxième phénomène celui de la rupture des fibres.

L'hypothèse que seule l'élongation des fibres de carbone intervient et d'une façon non négligeable avant le changement de pente de la courbe résistance électrique/déformation peut être confirmée par la comparaison des deux courbes résistance électrique/déformation obtenues pour les fibres 1,5 /1,7 % et 0,6 % d'allongement à la rupture (cf. fig. 3-8). En effet pour les faibles déformations la variation de résistance des fibres 1,5/1,7 % est supérieure à celle des fibres 0,6 %. Cela s'explique par le fait que la résistance électrique initiale des fibres 1,5/1,7 % (27  $\Omega$ ) est supérieure à celle des fibres 0,6 % (3,8  $\Omega$ ), la contribution due à l'élongation est donc plus importante pour les fibres 1,5/1,7 % (cf. équation 3-4). En revanche, dès que le phénomène de rupture intervient, la tendance des courbes résistance électrique/déformation s'inverse. En effet la rupture des fibres s'effectue plus tôt et avec une amplitude plus importante pour les fibres les plus fragiles, c'est à dire les fibres à 0,6 % d'allongement à la rupture.



**Fig. 3-8 : Comparaison des courbes de résistance électrique pour les fibres 0,6 % d'allongement à la rupture et 1,5/1,7 %**

Dans la mesure où avant rupture des fibres, pour certaines mèches de carbone (0,6 % et 1,5/1,7 % d'allongement à la rupture), les résultats de résistance électrique calculés correspondent pratiquement aux valeurs expérimentales, il apparaît donc envisageable d'accéder à la déformation du matériau à partir de l'écart de résistance électrique du capteur provenant de l'élongation des mèches de carbone.

### 3.1.3.2. Contribution due à la rupture des fibres

Le deuxième phénomène est la rupture des fibres qui entraîne une diminution de la section conductrice de la mèche de carbone et une augmentation de sa résistance électrique. D'une amplitude beaucoup plus importante que le premier, ce deuxième phénomène est à l'origine du changement de pente qui correspond donc à l'amorçage des premières ruptures des fibres.

La contribution due à l'élongation des fibres peut être définie en première approximation comme portée par la droite qui définit le changement de pente de la courbe résistance électrique/déformation. Les deux contributions, dues d'une part à l'élongation des fibres et d'autre part à la rupture des fibres, peuvent donc être déterminées pour chaque déformation donnée.

Il est alors possible de calculer le nombre de fibres de carbone rompues en considérant en première approximation la mèche de carbone comme un arrangement en parallèle de toutes les fibres [45], (cf. § 1-4-3-1). Sa résistance électrique équivalente est donnée par :

$$R_0 = \frac{R_F}{N} \quad (3-5)$$

où  $R_F$  correspond à la résistance électrique d'une fibre de carbone et  $N$  au nombre total de fibres de carbone. Si  $n$  fibres de carbone sont coupées le changement de résistance électrique est alors donné par :

$$\left( \frac{\Delta R_r}{R_0} \right)_n = \frac{(n/N)}{1 - (n/N)} \quad (3-6)$$

d'où

$$n = \frac{\Delta R_r N}{R_0 + \Delta R_r} \quad (3-7)$$

où  $\Delta R_r$  est l'augmentation de résistance électrique due à la rupture des fibres et  $R_0$  la résistance électrique initiale

Le tableau 3-2 présente la contribution des deux phénomènes intervenant dans l'augmentation de la résistance électrique trouvée expérimentalement pour une déformation arbitraire de 1,5 % avec les différents types de mèche, ainsi que le nombre de fibres cassées, ce qui permet de mieux appréhender la sensibilité des différents capteurs.

Type de capteur (All. à la rupture)	$R_0$ ( $\Omega$ )	$N$	$\Delta R_e$ ( $\Omega$ )	$\Delta R_r$ ( $\Omega$ )	$n$	$n/N$ (%)
2,1 %	19,48	12000	0,22	0,13	80	0,66
1,5/1,7 %	83,32	3000	0,77	1,30	46	1,5
0,6 %	12,45	12000	0,08	241,31	11411	95,09

**Tableau 3-2 : Calcul du nombre de fibres rompues (n) pour une déformation de 1,5 %**

### 3.1.4. Reproductibilité des mesures

Pour pouvoir utiliser les mèches de carbone comme capteurs d'endommagement, il convient de s'assurer de la reproductibilité des mesures. A cette fin, cinq essais de traction sont effectués dans des conditions similaires sur des éprouvettes à renfort 0/90°.

#### 3.1.4.1. Comparaison pour les différents types de fibres

Les essais de reproductibilité sont réalisés pour chaque type de mèche de carbone utilisé, soit pour des mèches de carbone d'allongement à la rupture de 2,1 %, 1,5/1,7 %, 0,6 % et 0,36 %. Les figures 3-9, 3-10, 3-11 et 3-12 présentent les courbes obtenues.

Sur les graphiques sont représentés les écarts maximum des déformations mesurées sur l'ensemble des cinq courbes, correspondant d'une part à la fin de linéarité des courbes et d'autre part aux déformations obtenues pour une valeur arbitraire d'augmentation de résistance électrique de 2  $\Omega$ . En effet, le capteur peut être considéré comme fiable si à partir d'une valeur de résistance électrique donnée, il est possible de trouver la déformation subie par le matériau hôte avec une marge d'erreur acceptable.

Le tableau 3-3 permet de quantifier la reproductibilité obtenue avec les différentes mèches de carbone. Les mèches de carbone d'allongement à la rupture 2,1 % présentent une reproductibilité moyenne, notamment au niveau de la fin de linéarité qui n'est pas aisément repérable du fait du faible niveau d'amplitude des variations de la résistance électrique. Cependant les écarts entre les différentes courbes résistance électrique/déformation restent pratiquement constants quelle que soit la variation de résistance électrique considérée. Les mèches de carbone 1,5/1,7 % présentent une meilleure reproductibilité (cf. fig. 3-13), cependant les courbes ont tendance à diverger lorsque les écarts de résistance électrique deviennent importants (supérieur à 20  $\Omega$ ). Les mèches de carbone de 0,6 % d'allongement à la rupture donnent des résultats encore plus reproductibles et les courbes ne divergent qu'après des écarts de résistance électrique supérieurs à 50  $\Omega$ . La reproductibilité des fibres 0,36 % est quant à elle un peu moins bonne et devient importante dès que l'on dépasse une augmentation de résistance électrique de plus de 2  $\Omega$ .

Cette reproductibilité moyenne obtenue avec les fibres 0,36 % peut être attribuée à des défauts intrinsèques de la fibre de carbone utilisée ou encore à des problèmes de mise en oeuvre. En effet, ce type de fibres étant très fragile, il est difficile de tendre les mèches de façon optimale sans les endommager lors de la fabrication des éprouvettes. Certaines mèches ont ainsi pu être endommagées lors de leur intégration dans le matériau composite, malgré les précautions prises, ce qui peut expliquer les différences de comportement observées pour les mèches 0,36 %.

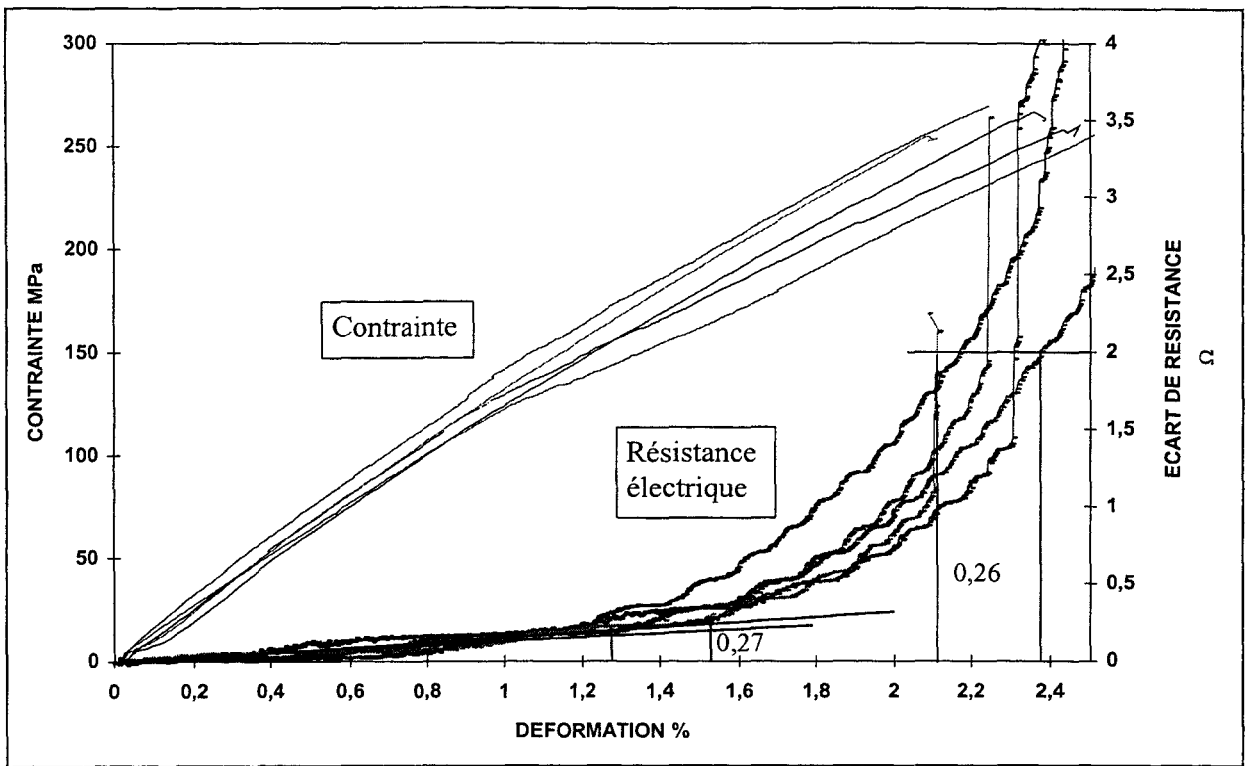


Fig. 3-9 : Reproductibilité des mesures pour des éprouvettes instrumentées avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 2,1 %

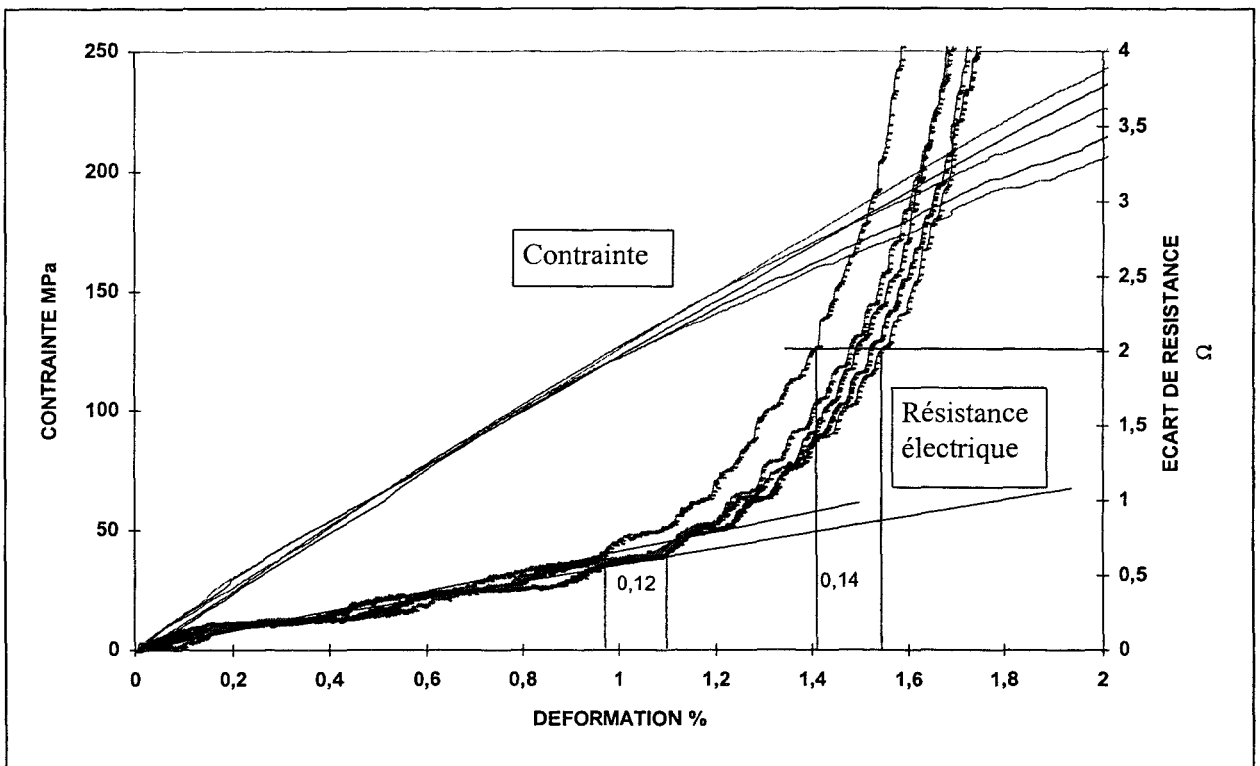


Fig. 3-10 : Reproductibilité des mesures pour des éprouvettes instrumentées avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 1,5/1,7%

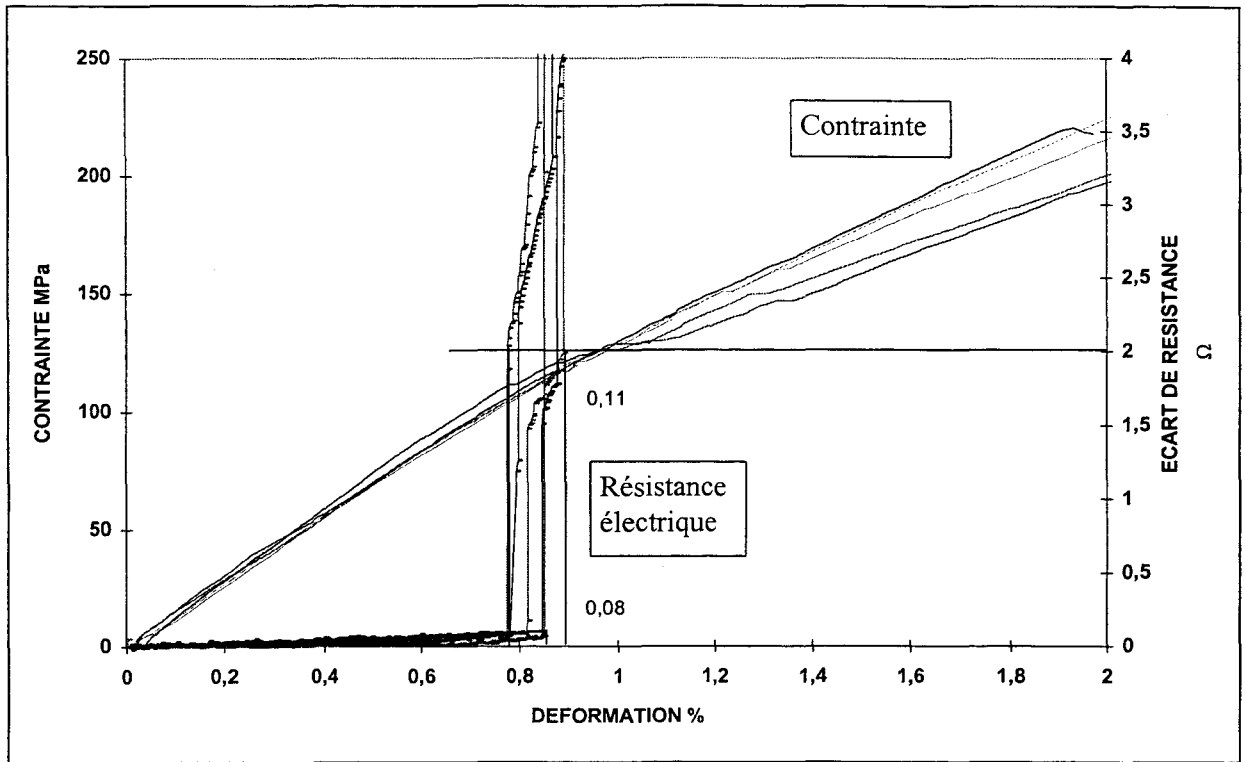


Fig. 3-11 : Reproductibilité des mesures pour des éprouvettes instrumentées avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 %

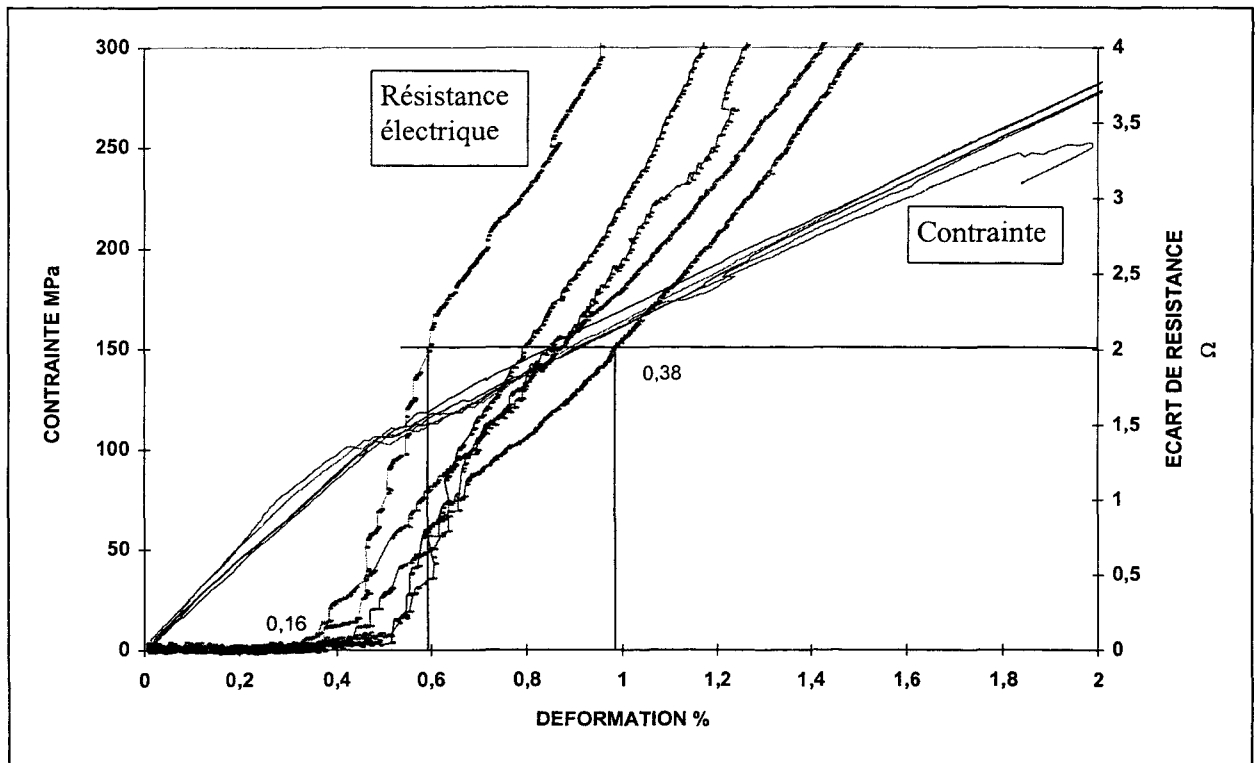


Fig. 3-12 : Reproductibilité des mesures pour des éprouvettes instrumentées avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 0,36 %

<b>Mèches d'allongement à la rupture</b> 2,1 %	Valeur moyenne $\epsilon_{\text{moy.}} (\%)$	Ecart type $\Delta\epsilon/\epsilon_{\text{moy.}} (\%)$	Ecart max. $\Delta\epsilon_{\text{max}} (\%)$
Déformations à la fin de linéarité	1,33	6,69	0,27
Déformations pour une résistance de 2 $\Omega$	2,33	3,82	0,26
<b>Mèches d'allongement à la rupture</b> 1,5/1,7 %			
Déformations à la fin de linéarité	1,10	3,77	0,12
Déformations pour une résistance de 2 $\Omega$	1,49	3,29	0,14
Déformations pour une résistance de 20 $\Omega$	1,83	4,15	0,19
<b>Mèches d'allongement à la rupture</b> 0,6 %			
Déformations à la fin de linéarité	0,81	3,58	0,08
Déformations pour une résistance de 2 $\Omega$	0,84	4,76	0,11
Déformations pour une résistance de 20 $\Omega$	0,98	3,98	0,10
<b>Mèches d'allongement à la rupture</b> 0,36 %			
Déformations à la fin de linéarité	0,45	23,18	0,16
Déformations pour une résistance de 2 $\Omega$	0,81	15,80	0,38
Déformations pour une résistance de 20 $\Omega$	2,21	6,33	0,37

**Tableau 3-3 : Reproductibilité des mesures**

Les deux mèches qui donnent les résultats les plus reproductibles sont donc les mèches de carbone d'allongement à la rupture 0,6 % et 1,5/1,7 % alors que les mèches de carbone d'allongement à la rupture 2,1 % et 0,36 % offrent une moins bonne reproductibilité. Les mèches d'allongement à la rupture 2,1 % sont en outre pas assez sensibles aux faibles déformations : elles ne constituent donc pas un capteur optimal pour le matériau hôte étudié. Les mèches de carbone d'allongement à la rupture 0,36 % sont les plus sensibles pour les faibles déformations, malheureusement leur reproductibilité n'est pas des meilleures, ce qui rend leur précision en tant que capteur d'endommagement plus faible. La mèche d'allongement à la rupture 0,6 %, en raison de sa bonne reproductibilité et de sa fin de linéarité électrique intervenant avant la fin du régime élastique du matériau hôte, apparaît comme la mieux appropriée pour le matériau étudié.

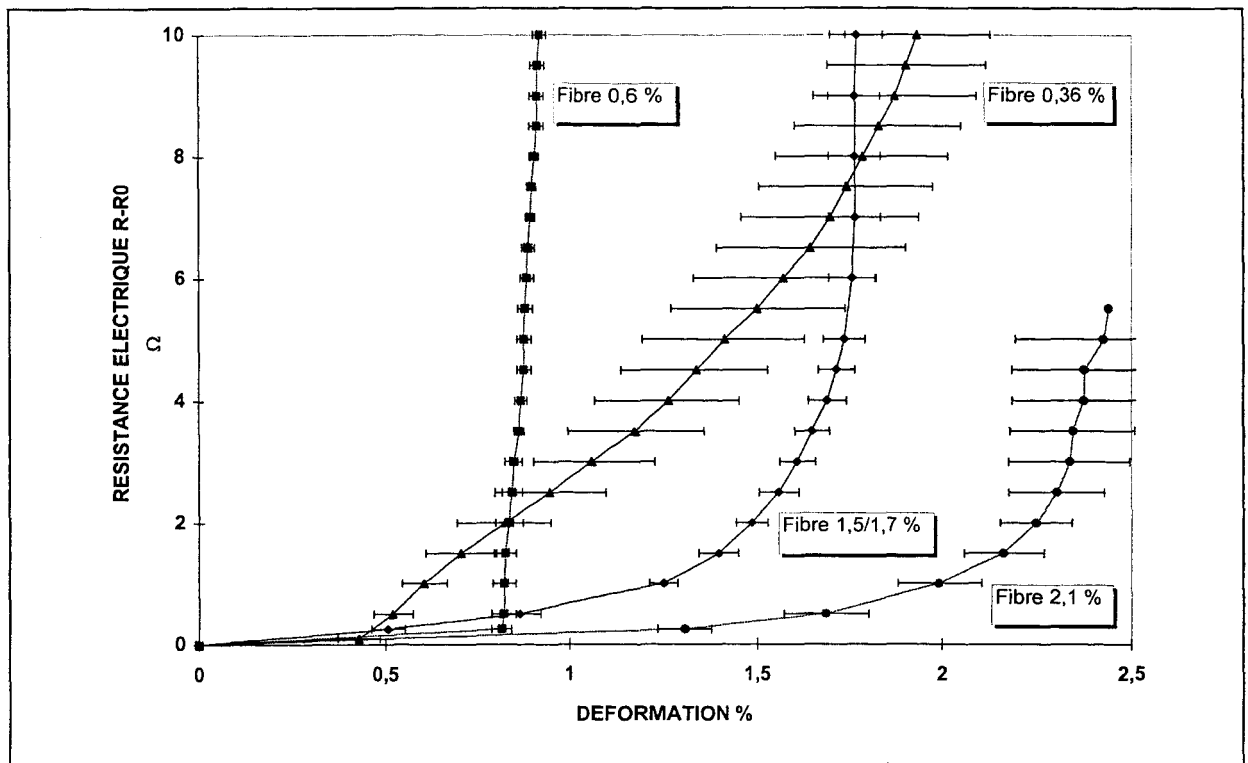


Fig. 3-13 : Courbes moyenne de résistance électrique pour les différentes mèches avec les écarts types correspondants (moyenne sur cinq mèches)

### 3.1.4.2. Divergence des courbes aux fortes déformations

Dans tous les cas, lorsque les écarts de résistance deviennent importants, à partir de valeurs qui dépendent du type de mèches de carbone utilisé, les courbes résistance électrique/déformation se mettent à diverger. Cela peut être expliqué car plus le nombre de fibres rompues est important, plus un écart de quelques fibres rompues en plus ou en moins d'une éprouvette à l'autre entraîne un décalage de résistance électrique important. En effet, si nous considérons les fibres de carbone comme un arrangement en parallèle de toutes les fibres de carbone, l'augmentation de la résistance électrique est donnée par l'équation (3-6) :

$$\left( \frac{\Delta R_r}{R_0} \right)_n = \frac{(n/N)}{1 - (n/N)} \quad (3-6)$$

(n: nombre de fibres coupées, N : nombre de fibres de carbone de la mèche,  $R_0$  : résistance électrique initiale)

En postulant que pour deux éprouvettes identiques testées successivement, il existe une différence de  $\delta n$  fibres coupées, la différence de résistance électrique entre les deux éprouvettes est égale à :



$$\delta(\Delta R) = R_0 \left( \frac{n + \delta n}{N - (n + \delta n)} - \frac{n}{N - n} \right) \quad (3-8)$$

En prenant  $\delta n$ ,  $R_0$  et  $N$  constants (comparaison entre deux mèches de carbone similaires ayant entre elles un même écart de fibres coupées), il apparaît que plus  $n$  est important (donc plus l'augmentation de résistance est forte), plus la différence de résistance électrique est importante, comme le montre l'application numérique suivante :

avec  $N = 3000$ ,  $R_0 = 80 \Omega$ ,  $\delta n = 10$  et pour deux valeurs de  $n$ .

Pour  $n = 100$              $\Delta R(100) = 2,76 \Omega$              $\delta(\Delta R) = 0,29 \Omega$

Pour  $n = 2000$          $\Delta R(2000) = 160 \Omega$          $\delta(\Delta R) = 2,42 \Omega$

Si le nombre de fibres rompues est faible, une petite différence entre deux éprouvettes sur leur nombre de fibres coupées aura une faible incidence sur la résistance électrique, en revanche lorsque le nombre de fibres coupées est important, cette même différence de fibres coupées entraînera des conséquences beaucoup plus importantes sur la variation de résistance électrique. Cela explique que lorsque la résistance électrique devient importante, les courbes correspondants aux différentes éprouvettes divergent.

### 3.1.4.3. Influence de la tension des mèches de carbone

Les résultats présentés précédemment ont été obtenus avec des mèches de carbone tendues, ce qui permet d'obtenir une tension initiale identique pour chaque fibre et aussi de placer les fibres de manière optimale : rectiligne et bien au centre de l'éprouvette. Des mesures effectuées avec des fibres d'allongement à la rupture 0,6 % non tendues sur des éprouvettes 0/90°, montrent que la reproductibilité des mesures est un peu moins bonne (cf. tab. 3-4). Celle-ci reste néanmoins satisfaisante, ce qui est intéressant dans la mesure où dans un contexte industriel l'instrumentation de pièces de grandes dimensions et de géométries complexes permet a priori difficilement d'envisager une tension parfaite des fibres servant de capteur.

Fibres d'allongement à la rupture de 0,6 %	Ecart maximal des valeurs de déformation correspondant à la fin de linéarité : $\Delta \varepsilon_{\max}$ (%)	Ecart maximal des déformations pour une résistance de $2 \Omega$ : $\Delta \varepsilon_{\max}$ (%)
Fibres tendues	0,12	0,14
Fibres non tendues	0,18	0,22

Tableau 3-4 : Influence de la tension des fibres de carbone

### 3.1.5. Influence du nombre de filaments de la mèche de carbone

Des essais de traction sont réalisés sur des éprouvettes à renfort 0/90° comportant des mèches Torayca® M 40. Les mèches de carbone utilisées ont toutes le même allongement à la rupture de 0,6 % et diffèrent les unes des autres seulement par leur nombre de filaments de carbone. Quatre types de mèches de carbone sont utilisés : 1 000 fibres (mèche 1 K), 3 000 fibres (3 K), 6 000 fibres (6 K) et 12 000 fibres (12 K).

#### 3.1.5.1. Influence sur la reproductibilité des mesures

Les figures 3-14, 3-15, 3-16 et 3-17 présentent les courbes contrainte/déformation et résistance électrique/déformation réalisées pour trois éprouvettes de chaque type afin de constater la reproductibilité des mesures. Pour les mèches 3 K, 6 K et 12 K, les écarts de déformation entre les trois éprouvettes pour une augmentation de résistance de 1 Ω sont inférieurs à 0,1 %. Pour les mèches de 1 K les courbes de résistance sont moins reproductibles avec un écart de plus de 0,19 % de déformation pour une augmentation de 1 Ω. En effet, pour des mèches de carbone comportant un faible nombre de fibres, une différence de quelques fibres cassées pour une déformation donnée va engendrer une plus forte variation de résistance électrique que pour une mèche de section plus importante. Si nous prenons comme hypothèse que les mèches de carbone constituent un arrangement en parallèle de toutes les fibres de carbone, et que pour deux éprouvettes à comparer, il y a une différence de  $\delta n$  fibres coupées, la différence de résistance électrique pour les deux éprouvettes est donnée par l'équation (3-8) :

$$\delta(\Delta R) = R_0 \left( \frac{n + \delta n}{N - (n + \delta n)} - \frac{n}{N - n} \right) \quad (3-8)$$

$n$ : nombre de fibres coupées,  $N$  : nombre de fibres de carbone de la mèche,  $R_0$  : résistance électrique initiale

La résistance électrique initiale est inversement proportionnelle au nombre de fibres (cf. éq. 3-5). Cette relation est pratiquement confirmée expérimentalement comme le montrent les résultats portés dans le tableau 3-5.

$$R_0 = \frac{R_F}{N} \quad (3-5)$$

d'où

$$\delta(\Delta R) = \frac{R_F}{N^2} \left( \frac{n + \delta n}{1 - \frac{(n + \delta n)}{N}} - \frac{n}{1 - \frac{n}{N}} \right) \quad (3-9)$$

$R_F$  : résistance électrique d'une fibre de carbone

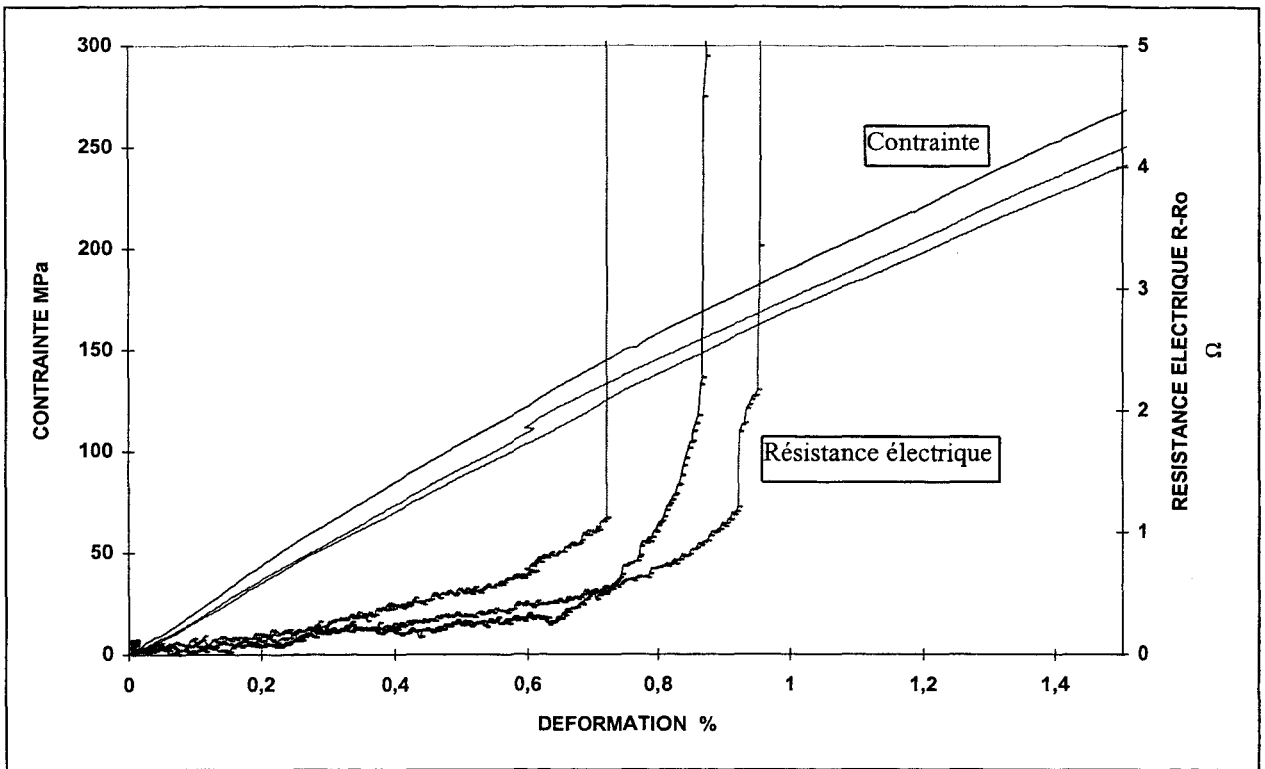


Fig. 3-14 : Essais de traction effectués pour des éprouvettes instrumentées avec des mèches de carbone 1 K (1 000 filaments)

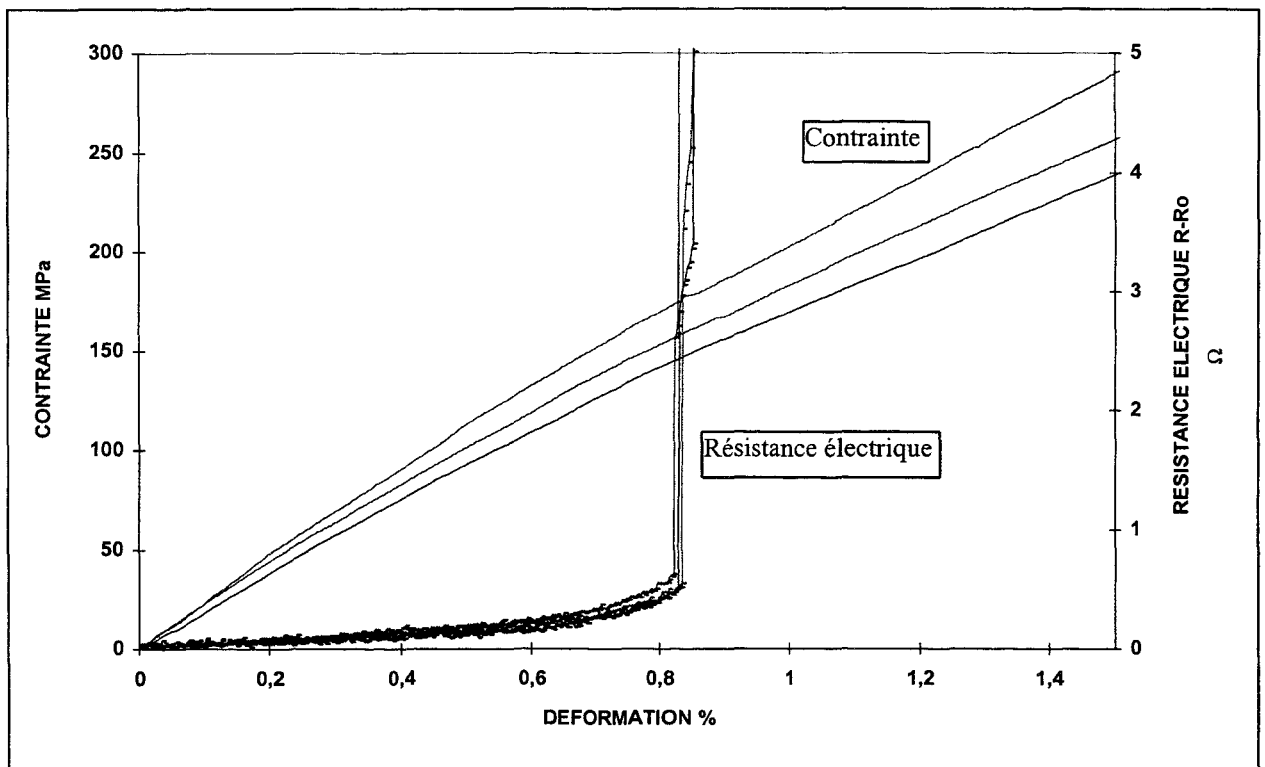


Fig. 3-15 : Essais de traction effectués pour des éprouvettes instrumentées avec des mèches de carbone 3 K (3 000 filaments)

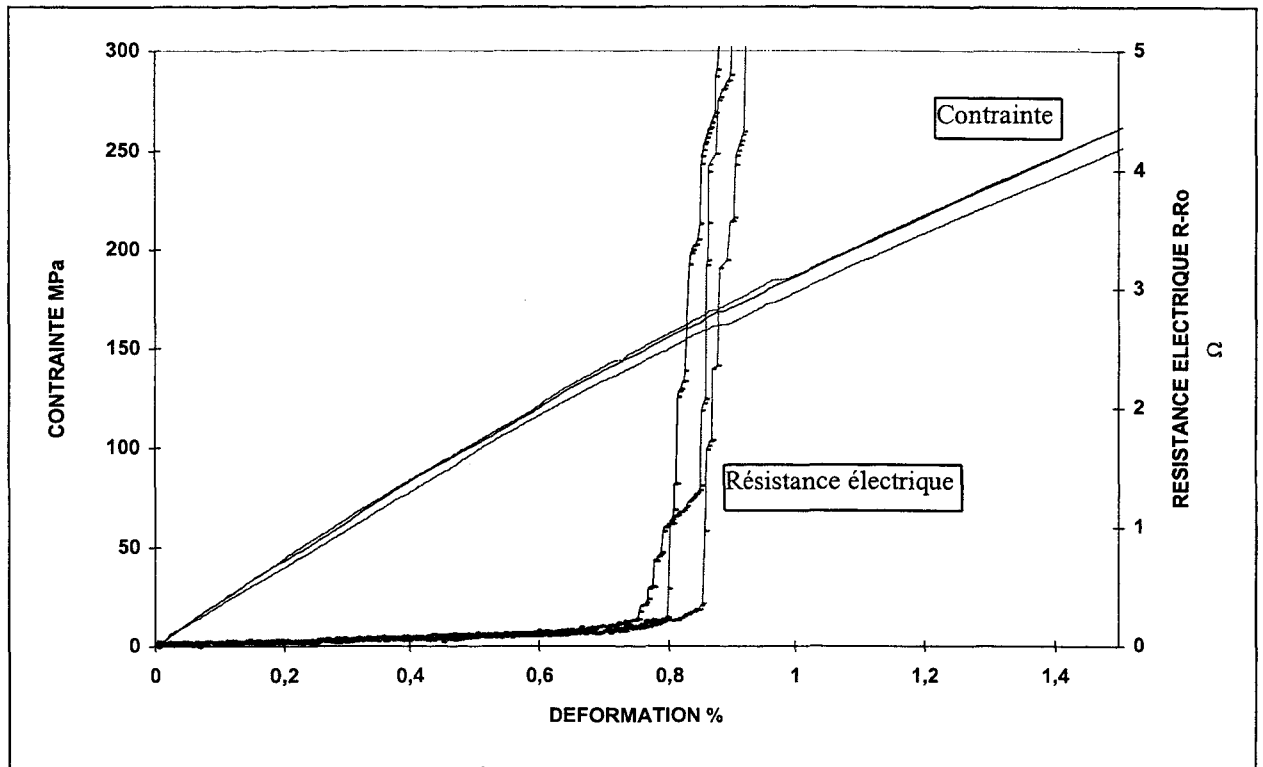


Fig. 3-16: Essais de traction effectués pour des éprouvettes instrumentées avec des mèches de carbone 6 K (6 000 filaments)

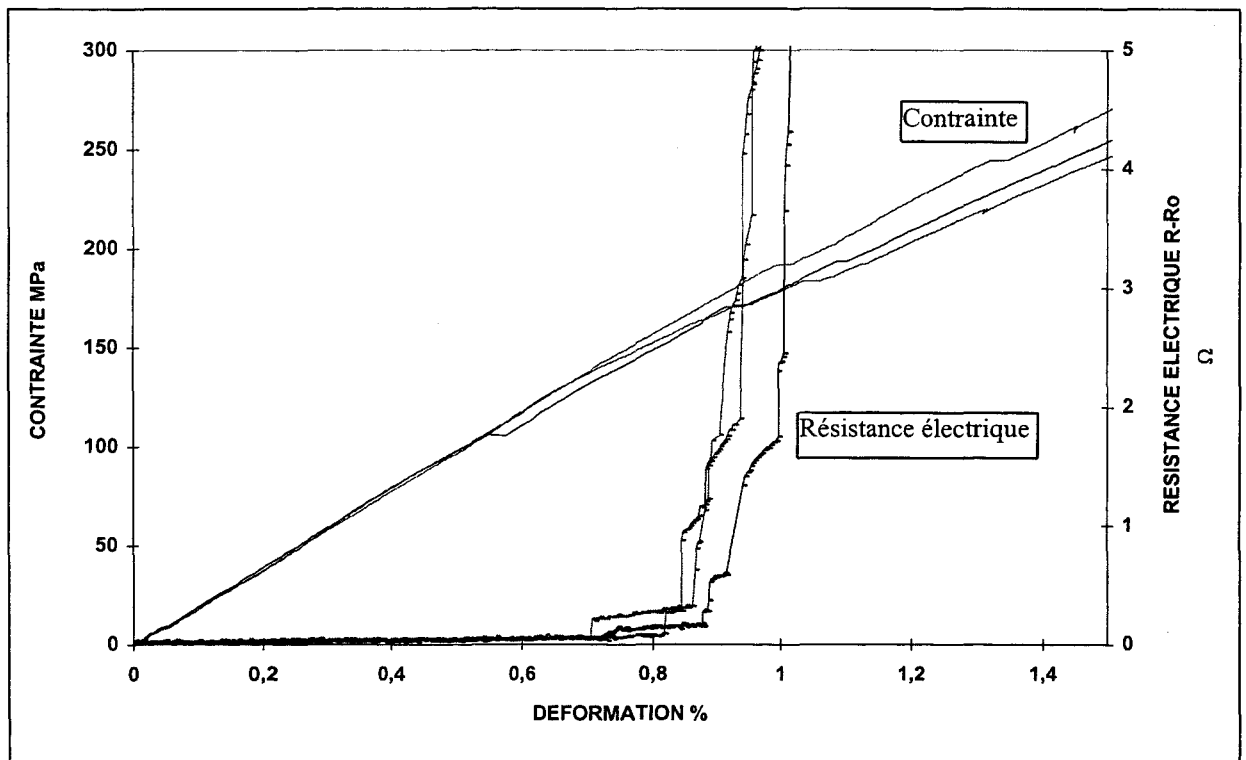


Fig. 3-17 : Essais de traction effectués pour des éprouvettes instrumentées avec des mèches de carbone 12 K (12 000 filaments)

D'après l'équation (3-9), il est logique que plus le nombre de fibres de la mèche N est faible, plus l'écart de résistance électrique résultant d'un même  $\delta n$  est important d'où une reproductibilité moins bonne pour les mèches 1 K.

Nombre de fibres	Résistance électrique initiale effective* (moy.) $\Omega$
1 000	43,04
3 000	14,37
6 000	7,43
12 000	3,71

**Tableau 3-5 : Résistance initiale en fonction du nombre de fibres**

Le nombre de filaments de la fibre considérée a donc une influence sur la reproductibilité des mesures. Ce facteur reste cependant secondaire, la nature de la mèche de carbone et notamment la dispersion des valeurs de rupture des différentes fibres composant les mèches étant prépondérante sur la reproductibilité.

### 3.1.5.2. Influence sur la pente à l'origine des courbes de résistance électrique

Sur la figure 3-18 sont représentées sur le même graphique les courbes contrainte/déformation et résistance électrique/déformation pour chaque type de mèche 1 K, 3 K, 6 K et 12 K. Les pentes à l'origine des courbes résistance électrique/déformation deviennent de plus en plus importantes, quand le nombre de fibres de carbone contenues dans la mèche diminue. Cette pente à l'origine est caractéristique du phénomène d'élongation des mèches. Or l'augmentation de la résistance électrique due à l'élongation des fibres est liée à la résistance électrique initiale des mèches qui est inversement proportionnelle au nombre de fibres (cf. tab. 3-5). La valeur de l'augmentation de la résistance électrique due à l'élongation des fibres est donnée par la relation (3-4) qui devient en remplaçant  $R_0$  par  $R_F/N$  :

$$\Delta R_e = \frac{R_F}{N} \varepsilon (1 + 2 \nu) \quad (3-10)$$

avec  $\nu$  : coefficient de Poisson

$\Delta R_e$  : variation de résistance électrique due à l'élongation des fibres

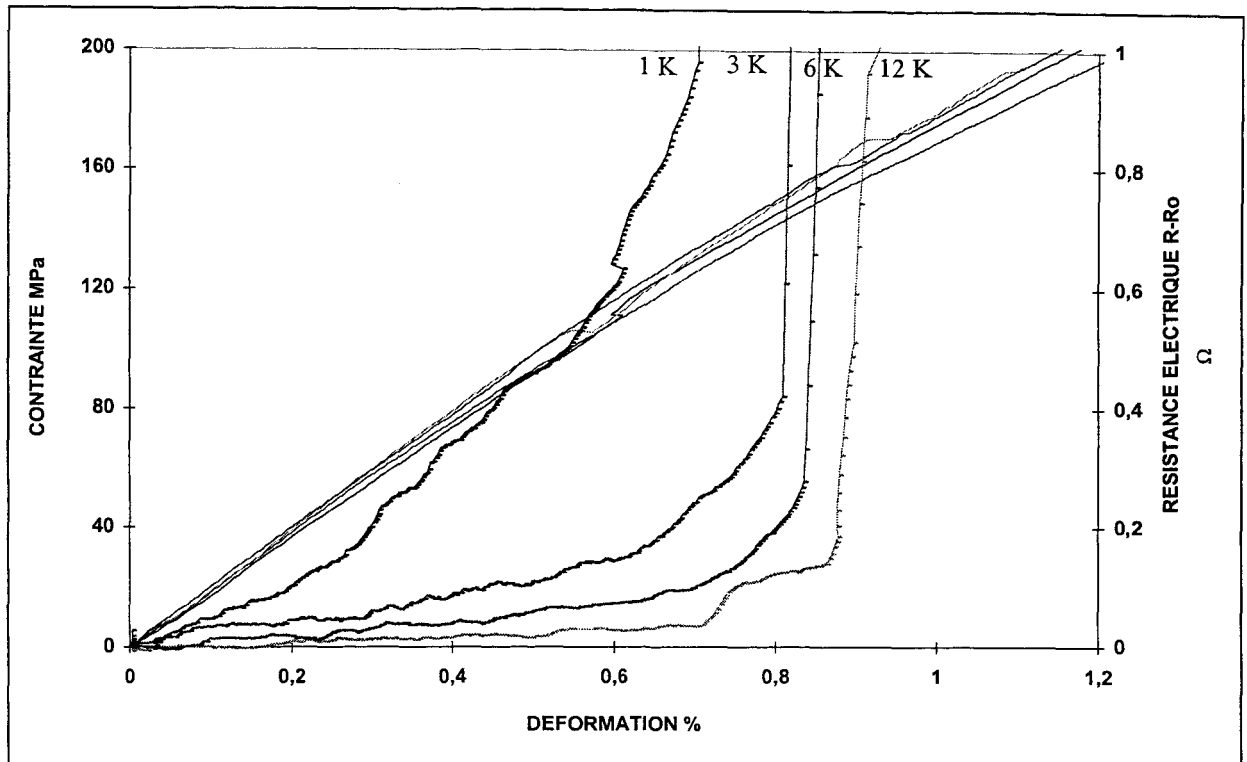
$\varepsilon$  : déformation

N : nombre de fibres contenues dans la mèche

$R_F$  : résistance électrique d'une fibre de carbone

\* La résistance électrique effective correspond à la résistance électrique de la partie de la mèche qui subit la déformation, c'est à dire que n'est pas pris en compte la longueur de mèche insérée dans les talons de l'éprouvette, ainsi que les parties de mèche en sortie de l'éprouvette permettant la connexion avec le circuit extérieur.

L'équation 3-10 montre que plus le nombre de filaments (N) dans la mèche est faible, plus l'augmentation de la résistance électrique due à l'élongation est forte.



**Fig. 3-18 : Comparaison des réponses électriques en traction de mèches de carbone possédant des nombres de filaments différents**

L'influence du nombre de filaments de la mèche de carbone utilisée comme capteur est donc loin d'être négligeable. Le nombre de filaments de la mèche de carbone est en effet l'un des paramètres (avec le coefficient de Poisson) qui conditionne l'augmentation de résistance électrique due à l'élongation des fibres de carbone.

### 3.1.5.3. Décalage des courbes vers les fortes déformations

Bien que les mèches de carbone considérées aient le même allongement à la rupture, il apparaît que l'augmentation de la résistance électrique intervient plus rapidement pour les mèches possédant un faible nombre de filaments, lors des essais de traction. Ainsi une augmentation de résistance de  $2 \Omega$  intervient pour une déformation de  $0,79 \%$  pour les mèches 1 K (moyenne sur les trois courbes), une déformation de  $0,83 \%$  pour les mèches 3 K, de  $0,85 \%$  pour les mèches 6 K et de  $0,98 \%$  pour les mèches 12 K. La figure 3-18 permet de voir que plus le nombre de filaments de la mèche est important plus les courbes résistance électrique/déformation ont tendance à se décaler vers la gauche. Ce décalage pour les faibles résistances électriques est en partie provoqué par le phénomène d'élongation qui provoque une augmentation plus importante de la résistance électrique pour les mèches de faible nombre de filaments. En outre, les ruptures des premières fibres de carbone ont un effet moins significatif sur l'augmentation de la résistance électrique pour une mèche comportant un nombre élevé de fibres. En effet, la rupture d'un pourcentage de fibres donné par rapport au

nombre total de fibres de la mèche a une conséquence plus importante sur l'augmentation de la résistance électrique d'une mèche de faible nombre de filaments, comme le montre l'équation (3-11).

$$\Delta R_r = R_0 \frac{n}{N-n} = \frac{R_F}{N} \frac{a N}{N-a N} = \frac{R_F}{N} \frac{a}{1-a} \quad (3-11)$$

où a est le pourcentage de fibres de carbone rompues

Plus N est petit, plus  $\Delta R_r$  sera élevé. Le nombre de filaments de la mèche de carbone a donc une influence sur la déformation correspondant aux variations de résistance électrique dues aux ruptures de fibre. Mais celle-ci reste très secondaire devant le rôle joué par l'allongement à la rupture de la mèche de carbone.

#### 3.1.5.4. Valeur du nombre de filaments des mèches de carbone à utiliser préférentiellement

L'influence du nombre de filaments de la mèche de carbone est importante, si l'augmentation de résistance électrique due à l'élongation des fibres de carbone est utilisée, car celle-ci est inversement proportionnelle au nombre de filaments de la fibre. Si la mèche a un nombre de filaments trop important, cela rend inutilisable la réponse du capteur correspondant à l'élongation des fibres car l'amplitude du signal est trop faible pour être analysée. Les nombres de filaments les plus favorables, lorsque l'on utilise l'augmentation de la résistance électrique due à l'élongation des fibres, sont donc inférieurs à 6 K.

En revanche si l'augmentation de la résistance électrique due à la rupture des fibres est utilisée, l'influence du nombre de filaments reste secondaire. Même si cette influence n'est pas primordiale, l'étude réalisée montre qu'un nombre de filaments inférieur ou égal à 1 K entraîne des dispersions plus importantes des mesures. De plus, un nombre de filaments important provoque une réponse du capteur pour des déformations plus élevées, ce qui est contraire à l'objectif fixé qui consiste à concevoir un capteur sensible à de faibles endommagements. Les nombres de filaments les plus favorables, lorsque l'on utilise l'augmentation de la résistance électrique due à la rupture des fibres, se situent donc entre 3 K et 10 K.

#### 3.1.6. Influence du matériau hôte sur la réponse du capteur

Pour vérifier que la réponse du capteur est indépendante du matériau dans lequel il est intégré, des mèches de carbone de 1,5/1,7 % sont insérées dans des éprouvettes possédant différents types de renforts (0/90°, ± 45°, 0°). Bien que les courbes contrainte/déformation soient différentes pour chaque type de renfort, il s'avère que les courbes de résistance électrique/déformation obtenues sont très proches les unes des autres. Elles se situent à l'intérieur de l'intervalle d'incertitude obtenu pour les essais de reproductibilité, ce qui signifie donc que le matériau hôte a une influence négligeable sur la réponse du capteur (cf. fig. 3-19).



Ces résultats confirment que la réponse du capteur n'est pas directement corrélée à l'endommagement du matériau hôte : en effet la réponse du capteur est la même pour des renforts  $\pm 45^\circ$  que pour des renforts  $0/90^\circ$  alors que la fin de linéarité de la courbe contrainte/déformation intervient pour une déformation beaucoup plus faible pour les renforts  $\pm 45^\circ$ . Il convient donc d'adapter le capteur utilisé au comportement du matériau étudié dans un champ de sollicitation donné, notamment en jouant sur l'allongement à la rupture des mèches de carbone utilisées.

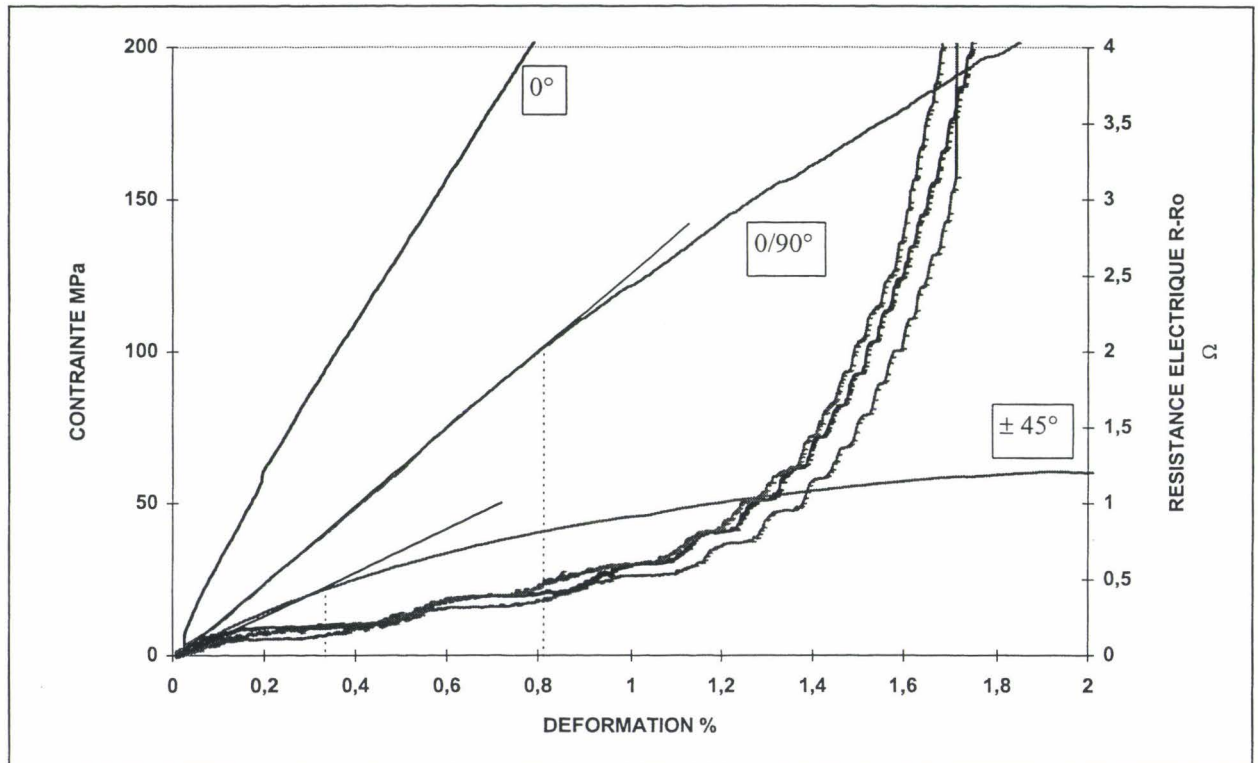
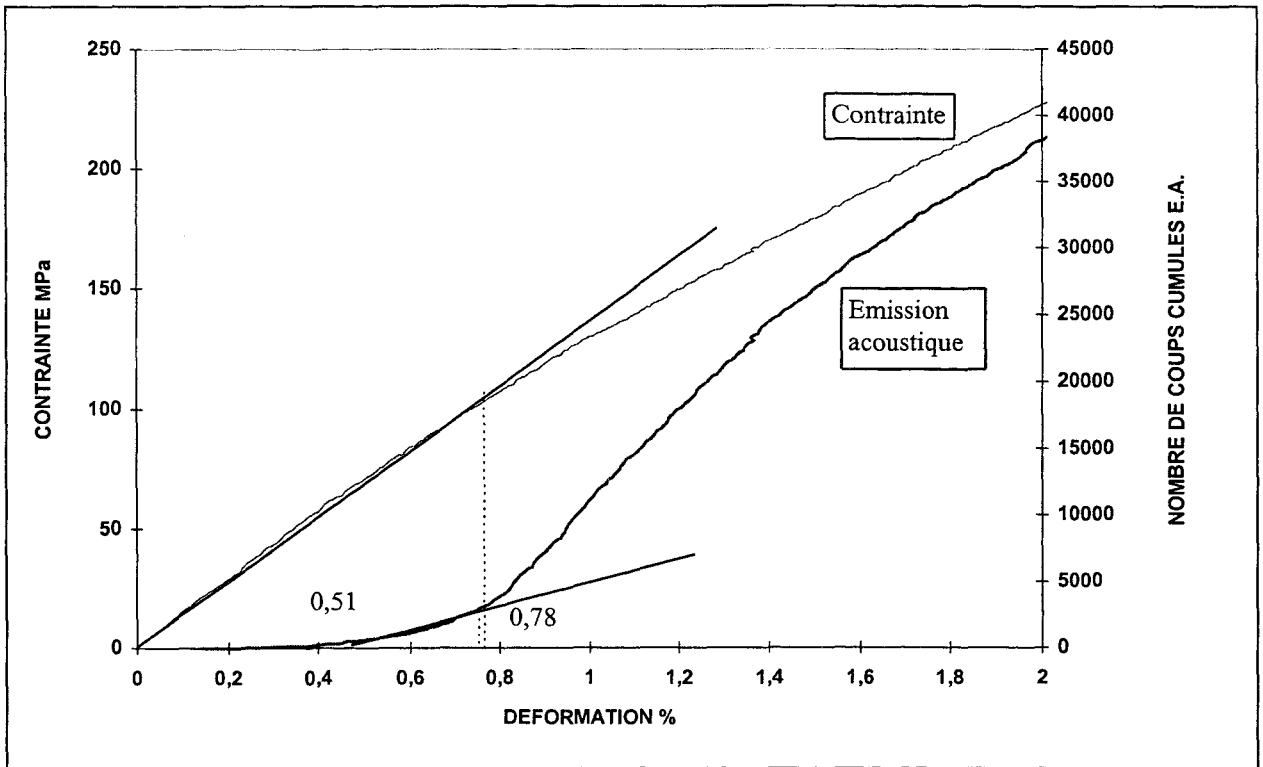


Fig. 3-19 : Influence des différents types de renfort sur la réponse électrique de mèches de carbone

### 3.1.7. Influence des mèches de carbone sur les caractéristiques mécaniques du matériau hôte

Le capteur d'endommagement ne doit pas par son implantation faire chuter les caractéristiques mécaniques du matériau à contrôler. Pour vérifier que l'introduction des capteurs d'endommagement ne fragilise pas le matériau hôte, un essai de traction sur éprouvette témoin, sans mèche de carbone est réalisé. La courbe contrainte/déformation d'une éprouvette témoin présente un coude pour une déformation de 0,78 %, soit pour une déformation identique à celle des éprouvettes instrumentées (cf. fig. 3-20, § 3-1-1 et § 3-1-2). Pour la courbe d'émission acoustique, le décollement ainsi que le coude de la courbe ont lieu pour des déformations comparables à celle des éprouvettes instrumentées, respectivement pour des déformations de 0,51 % et 0,77 %. L'introduction de la mèche de carbone ne favorise donc pas l'initiation de l'endommagement du matériau hôte.





**Fig. 3-20 : Courbes de comportement d'une éprouvette témoin (sans mèche de carbone insérée)**

D'autres essais de traction effectués sur trois éprouvettes témoins, trois éprouvettes instrumentées avec des mèches de carbone d'allongement à la rupture 0,6 % et trois éprouvettes avec des mèches 0,36 % permettent de comparer les caractéristiques mécaniques des différentes éprouvettes. Les modules, contraintes à la rupture et déformations à la rupture moyens sont présentés dans le tableau 3-6.

	Eprouvette témoin	Eprouvette avec mèche 0,6 %	Eprouvette avec mèche 0,36 %
Module moyen (MPa)	19 458	20 804	26 721
Ecart-type	199,7	176,8	271,6
Contrainte à la rupture moyenne (MPa)	303,7	286,7	305,1
Ecart-type	11,7	7,9	6,9
Déformation moyenne à la rupture (%)	2,34	2,26	2,30
Ecart-type	0,18	0,08	0,07

**Tableau 3-6 : Caractéristiques mécaniques pour des éprouvettes avec et sans capteur**

Le fait d'insérer des fibres de carbone entraîne une augmentation du module de l'éprouvette car le module des fibres de carbone est 5 à 10 fois plus important que celui des fibres de verre de renfort. Au niveau des caractéristiques à la rupture, il n'y a pas de différence notable entre les éprouvettes témoins et les éprouvettes avec fibres 0,36 %. Pour les éprouvettes instrumentées avec les fibres 0,6 %, une légère baisse des caractéristiques à la rupture peut être observée au niveau des valeurs moyennes (de l'ordre de 5 %). Cette chute peut être due à la rupture brusque des fibres de carbone du capteur à 0,6 % d'allongement à la rupture qui peut fragiliser l'éprouvette.

Par ailleurs, il est facile de calculer le module d'une éprouvette instrumentée en utilisant une loi des mélanges :

$$E = \varphi_v E_{fc} + (1-\varphi_v) E_{sfc} \quad (3-12)$$

avec  $E$  : module moyen calculé des éprouvettes instrumentées avec les mèches de carbone  
 $\varphi_v$  : taux en volume des fibres de carbone dans l'éprouvette  
 $E_{fc}$  : module des fibres de carbone donné par le fournisseur (392 10<sup>3</sup> MPa pour les fibres d'allongement à la rupture 0,6 %)  
 $E_{sfc}$  : module moyen des éprouvettes sans mèche de carbone mesuré expérimentalement (19458 MPa)

Pour les fibres de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 %, le nombre de fibres contenues dans la mèche est connu (12 000) ainsi que le diamètre des fibres 6,5  $\mu\text{m}$ , ce qui permet de calculer sans difficulté le taux en volume des fibres de carbone en rapportant la section de la mèche à la section de l'éprouvette (ici  $\varphi_v = 0,368$  %). Le module expérimental moyen obtenu sur des éprouvettes avec des fibres de carbone à 0,6 % d'allongement à la rupture est comparé avec le module théorique calculé d'après la loi des mélanges pour une éprouvette avec une mèche à 0,6 % d'allongement à la rupture, dans le tableau 3-7. Les deux valeurs sont très proches, ce qui signifie qu'il n'y a pas de problème d'interface notable entre la mèche de carbone servant de capteur et le composite verre/résine.

Valeur expérimentale moyenne pour les éprouvettes avec mèche 0,6 % (MPa)	Valeur théorique moyenne pour les éprouvettes avec mèche 0,6 % (MPa)
20 804	20 854

**Tableau 3-7 : Comparaison du module expérimental et théorique pour une éprouvette instrumentée avec une mèche de carbone à 0,6 % d'allongement à la rupture**

Les résultats obtenus montrent donc que l'intégration des capteurs n'engendre pratiquement pas de perturbations néfastes sur le comportement mécanique du composite hôte. Cela constitue un atout non négligeable par rapport aux autres capteurs d'endommagement concurrents comme les fibres optiques et les capteurs piézo-électriques.

### 3.1.8. Influence des conditions d'environnement

Dans les paragraphes précédents, il a été montré que la résistance électrique d'une mèche de carbone varie en fonction de la déformation subie par celle-ci. Il convient maintenant de vérifier dans quelle mesure la variation de paramètres extérieurs tels que l'humidité relative ou la température peut avoir une influence perturbatrice sur la réponse des capteurs. En effet le capteur développé doit pouvoir être utilisé en milieu industriel ou à l'extérieur : idéalement, sa réponse doit être indépendante des variations de température et d'humidité relative.

#### 3.1.8.1. Influence de l'humidité relative

Des mesures des résistances électriques de mèches de carbone, réalisées avec un nano-ohmètre, sont effectuées dans une enceinte climatique à humidité contrôlée en faisant varier le taux d'humidité relative de 10 % à 95 % à température constante (21°C). Les essais sont réalisés sur deux types de mèches de carbone : mèches d'allongement à la rupture de 0,36 % (résistance électrique initiale de 3,3  $\Omega$ ) et de 0,6 % (résistance électrique initiale de 11,7  $\Omega$ ) à raison de cinq essais par type de mèche. La variation de la résistance électrique relevée est toujours inférieure à 0,015  $\Omega$ , valeur faible comparativement aux variations de résistance électrique engendrées par la déformation de la mèche de carbone. L'influence du taux d'humidité peut être considérée comme négligeable sur la réponse électrique des capteurs mèche de carbone.

#### 3.1.8.2. Influence de la température

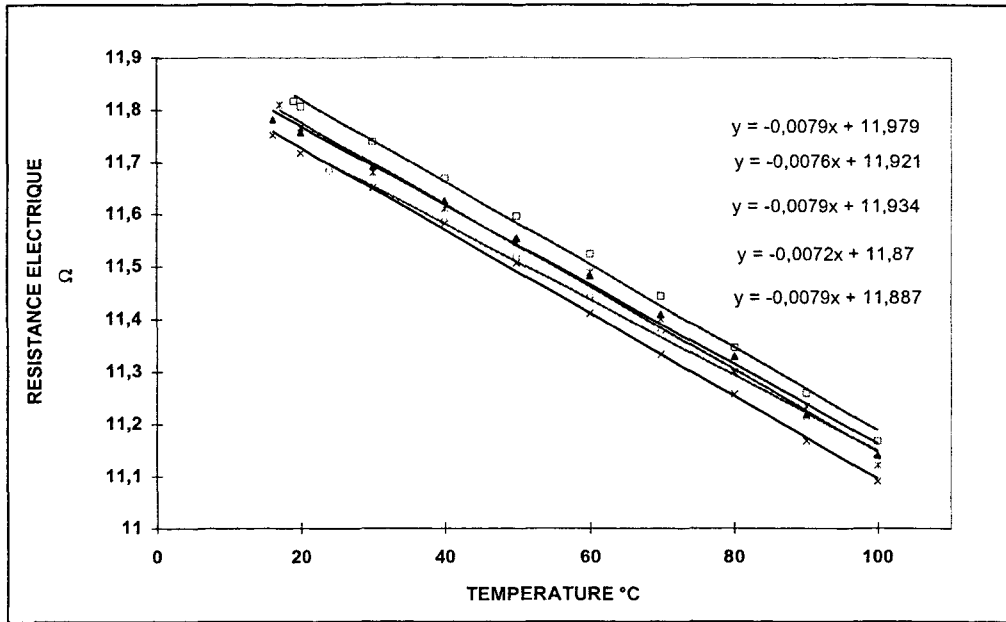
Dans le but de mettre en évidence l'effet de la température sur la réponse du capteur résistif, un suivi de l'évolution de la résistance électrique des mèches de carbone est réalisé sur une plage de température de 15°C à 100°C. Les essais sont réalisés d'une part sur mèches de carbone seules et d'autre part sur mèches intégrées dans des éprouvettes verre/résine, pour les différents types de fibres à raison de cinq mesures par configuration.

##### 3.1.8.2.1. Fibre 0,6 %

Dans un premier temps, les essais sont réalisés sur des mèches d'allongement à la rupture de 0,6 % et de résistance électrique initiale moyenne de 11,8  $\Omega$ . Les courbes de résistance électrique en fonction de la température sont présentées sur la figure 3-21. Une diminution quasi-linéaire de la résistance électrique avec l'augmentation de la température est mise en évidence. Une baisse moyenne de 7,7 m $\Omega$ /°C est enregistrée. Sur le graphique, sont figurées les approximations linéaires, ainsi que les équations de droite correspondantes.

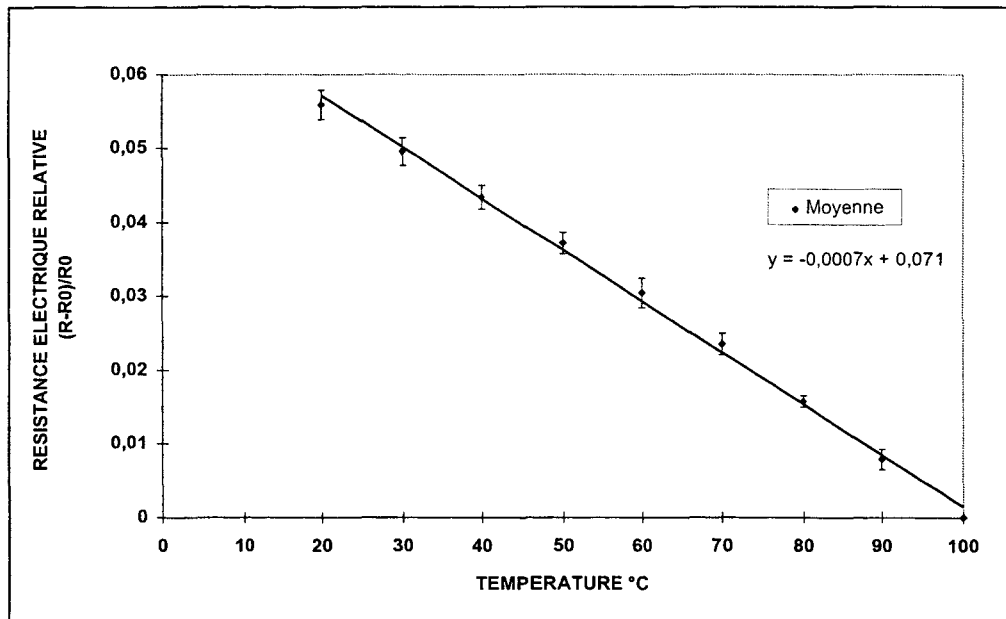
La diminution de la résistance électrique avec la température peut être expliquée par le caractère semi-conducteur des fibres de carbone [55]. En effet, pour un matériau conducteur l'augmentation de la température entraîne une augmentation de sa résistance électrique, en raison de l'agitation thermique qui a tendance à perturber le mouvement préférentiel des électrons donné par le courant électrique. En revanche, pour un matériau semi-conducteur, un apport de chaleur donc un apport d'énergie permet à des électrons de la bande de valence

proches du niveau de Fermi de sauter la bande interdite et de se placer dans la bande de conduction. Il y a donc augmentation de la conductibilité et diminution de la résistance électrique avec l'augmentation de température.



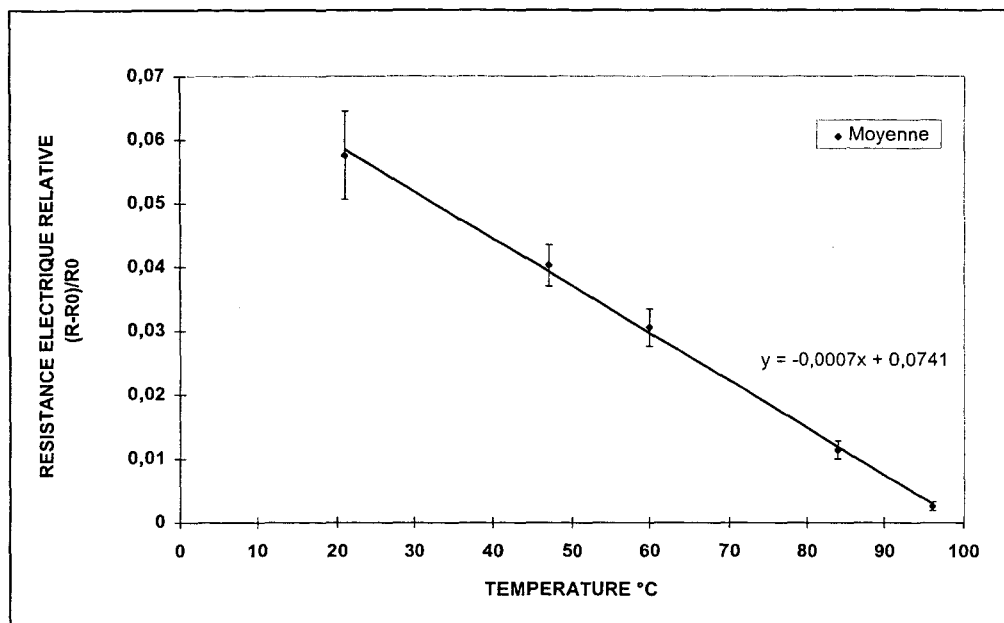
**Fig. 3-21 : Variation de la résistance électrique en fonction de la température pour des mèches de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 %**

Afin de comparer les résultats des différentes fibres de carbone en supprimant les effets dus aux différences des résistances électriques initiales, les résistances relatives  $((R-R_0)/R_0)$  sont prises en compte (avec  $R_0$  pris à 100 °C). Les valeurs moyennes, ainsi que les écarts-type obtenus sont représentés sur la figure 3-22. La valeur de la pente de la droite moyenne est de  $-7 \cdot 10^{-4} \text{ °C}^{-1}$ .



**Fig. 3-22 : Variation de la résistance électrique relative en fonction de la température pour une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 %**

Des essais similaires sont effectués avec des mèches de carbone d'allongement à la rupture 0,6 % intégrées dans une éprouvette de composite verre/résine, afin de vérifier si l'intégration des mèches de carbone à l'intérieur du composite apporte des modifications de leur comportement électrique en fonction de la température. Une stabilisation d'une heure pour chaque mesure de température est réalisée pour laisser à la chaleur le temps de diffuser au coeur de l'éprouvette. Les résultats (cf. fig. 3-23) ne montrent aucune variation notable entre les mèches de carbone seules et les mèches intégrées dans les éprouvettes composites. Cela signifie que l'effet de dilatation thermique du matériau hôte, positif pour un composite verre/résine, ne modifie pas de façon notable le comportement du capteur.



**Fig. 3-23 : Variation de la résistance électrique relative en fonction de la température pour une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 % intégrée dans une éprouvette**

### 3.1.8.2.2. Fibres 0,36 %

Les mêmes mesures sont effectuées pour une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,36 % et de résistance électrique initiale moyenne de 3,2  $\Omega$ . Une diminution de 5 m $\Omega$ /°C est relevée ainsi qu'une pente de  $-1,7 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  pour la courbe résistance électrique relative/température. Le comportement de la résistance électrique en fonction de la température diffère donc d'une mèche de carbone à l'autre puisque les valeurs des pentes des droites résistance électrique relative/température sont différentes pour les fibres d'allongement à la rupture 0,36 % et 0,6 % ( $-7 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  et  $-1,7 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ). La variation de résistance électrique en fonction de la température dépend donc de la nature même de la fibre de carbone et de son procédé de fabrication.

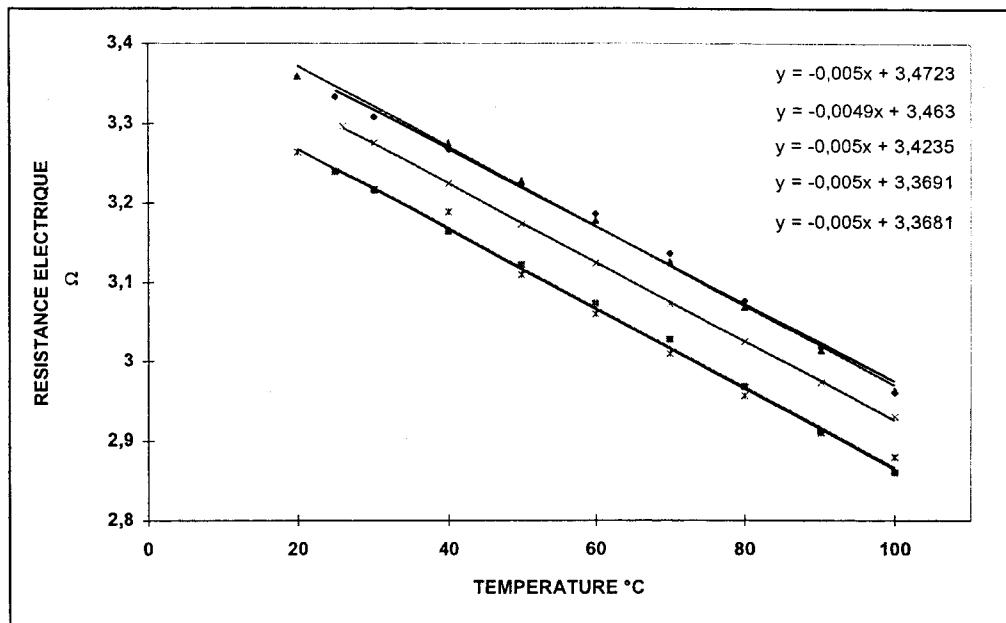


Fig. 3-24 : Variation de la résistance électrique en fonction de la température pour une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,36 %

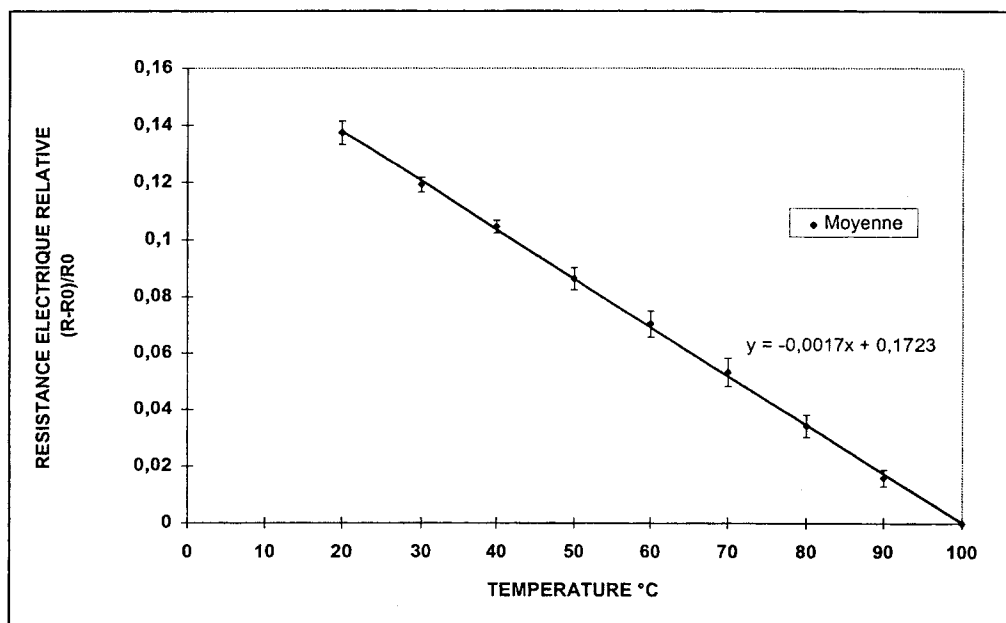


Fig. 3-25 : Variation de la résistance électrique relative en fonction de la température pour une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,36 %

### 3.1.8.2.3. Facteurs correctifs

Les variations de résistance électrique dues à la température sont relativement faibles, inférieures à  $10 \text{ m}\Omega/\text{°C}$ . Si l'augmentation de résistance électrique due à la rupture des fibres de carbone est mesurée, la variation de résistance électrique provenant du facteur température peut être généralement négligée, car l'augmentation de résistance électrique provoquée par la rupture de fibres de carbone est soudaine et d'amplitude plus importante ( $> 0,2 \Omega$ ).

En revanche, dans le cas du suivi de l'augmentation de la résistance électrique provenant de l'élongation des fibres de carbone, l'augmentation de résistance se fait en continu et avec une amplitude faible de l'ordre de 50 mΩ pour une déformation de 0,1 %. Des variations importantes de température peuvent donc perturber les mesures. Sachant que la variation de la résistance électrique est linéaire avec la température, il est cependant simple de corriger la résistance électrique relevée afin de considérer uniquement les variations de résistance électriques induites par la déformation. Il suffit pour cela de mesurer la température en continu, on obtient alors :

$$R_{\text{mesurée}} = R_{\text{initiale}} + \Delta R_{\text{déformation}} + \Delta R_{\text{température}}$$

$$\Delta R_{\text{déformation}} = R_{\text{mesurée}} - R_{\text{initiale}} - K \cdot \Delta T \quad (3-13)$$

avec :

$R_{\text{initiale}}$	: résistance électrique de la mèche de carbone à l'état initial au repos
$R_{\text{mesurée}}$	: résistance de la mèche de carbone servant de capteur à l'instant t
$\Delta R_{\text{déformation}}$	: variation de la résistance électrique de la mèche de carbone due à son élongation
$\Delta R_{\text{température}}$	: variation de la résistance électrique due à la température
K	: pente de la droite résistance électrique/température
$\Delta T$	: variation de température entre les températures à l'instant t et l'instant initial

### 3.1.9. Synthèse de l'étude en traction monoaxiale

Cette étude a permis la validation du capteur résistif d'endommagement développé pour une sollicitation en traction monoaxiale. En effet, les réponses électriques des mèches de carbone obtenues lors des essais sont reproductibles et il est possible de modifier la sensibilité du capteur à la déformation exercée en fonction des caractéristiques physiques de la mèche de carbone utilisée (telles que son allongement à la rupture ou son nombre de filaments), afin de mettre en évidence le niveau d'endommagement désiré du matériau contrôlé. D'autre part l'intégration du capteur ne détériore pas les caractéristiques mécaniques du matériau hôte et il n'y a pas de facteur perturbateur sur la réponse électrique du capteur autre que la température dont l'effet peut être facilement corrigé.

Par ailleurs, on a montré que la réponse électrique de la mèche de carbone est indépendante des propriétés du matériau hôte dans lequel la mèche est intégrée. Les courbes résistance électrique/déformation obtenues constituent donc des courbes caractéristiques des différents types de mèches de carbone utilisés pour la sollicitation appliquée.

Cependant pour une application industrielle, les pièces à instrumenter sont soumises à des sollicitations complexes. Il faut donc étudier le comportement du capteur sous d'autres modes de sollicitations, et notamment l'effet d'un déchargement de contrainte sur la valeur de la résistance électrique du capteur. L'endommagement étant un phénomène irréversible, il convient de vérifier si un tel capteur est capable de conserver une mémoire des déformations passées et éviter ainsi un enregistrement continu de la résistance électrique du capteur comme avec un simple capteur de déformation du type jauge d'extensométrie.

## 3.2. Application à d'autres modes de sollicitation

La première partie de l'étude expérimentale a servi de base pour analyser le comportement des mèches de carbone utilisées comme capteurs d'endommagement sous l'effet d'une sollicitation simple : un effort de traction parallèle à la direction des fibres de carbone. Cette deuxième partie vise à déterminer le comportement des mèches de carbone sous d'autres sollicitations mécaniques statiques et dynamiques.

### 3.2.1. Autres sollicitations statiques

Sachant qu'en pratique les pièces industrielles en composite sont susceptibles d'être soumises à des états de chargement complexes, il est intéressant d'analyser la réponse du capteur résistif dans les configurations de sollicitation telles que la flexion (combinaison d'efforts normaux et de cisaillement interlaminaire) sur appuis rapprochés ou non.

#### 3.2.1.1. Flexion

##### 3.2.1.1.1. Analyse comparée pour différents types de mèches de carbone

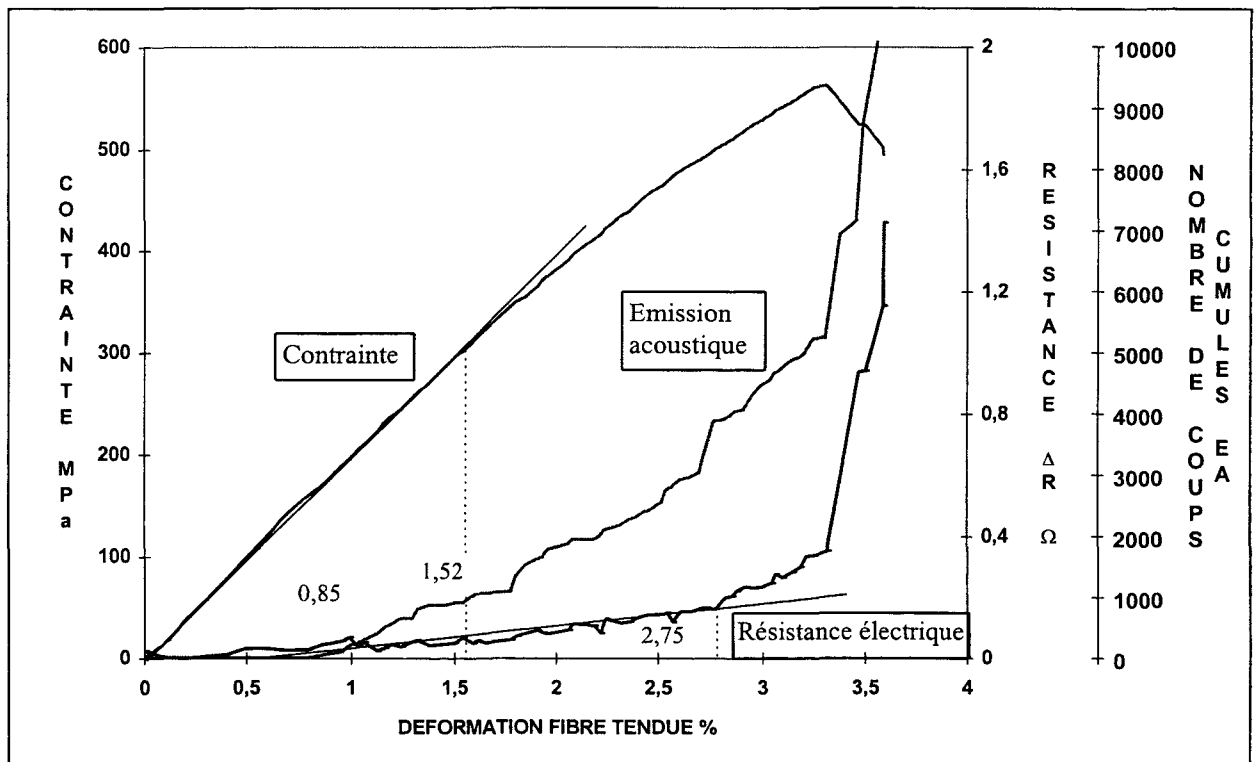
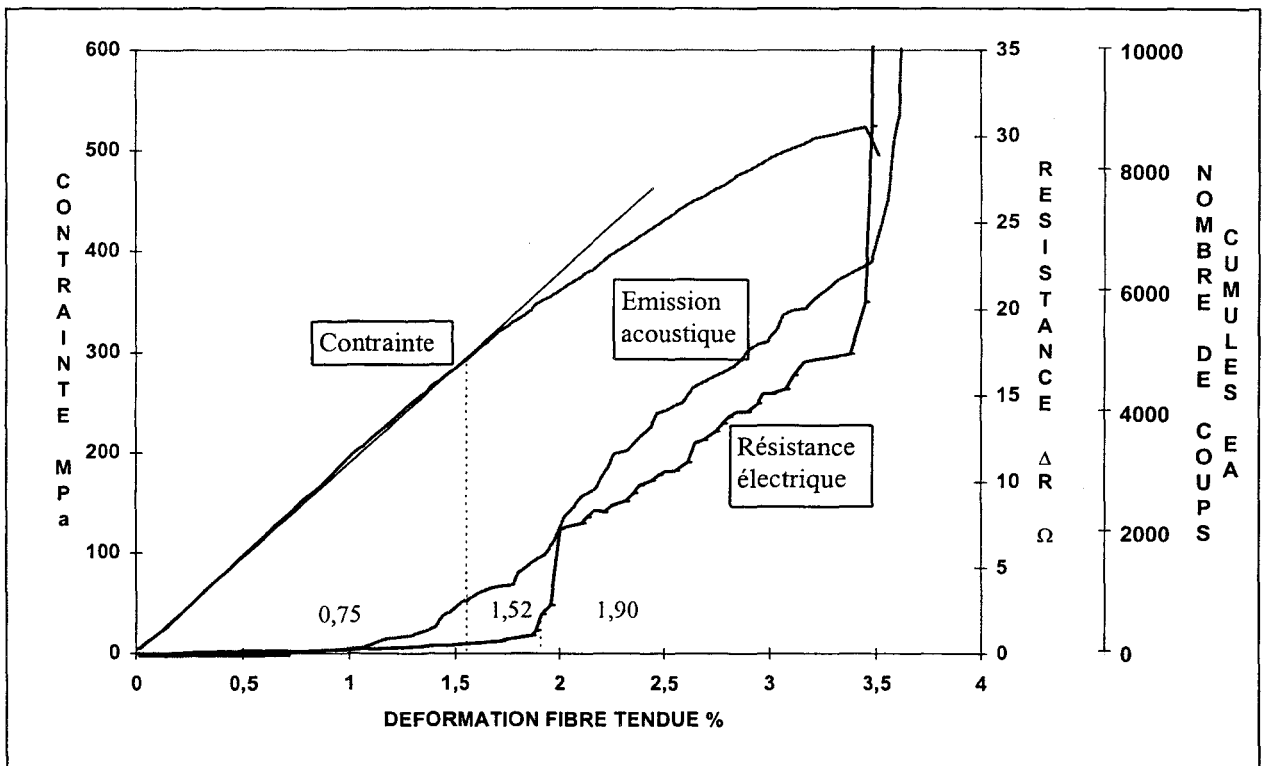


Fig. 3-26 : Courbes obtenues en flexion sur éprouvette instrumentée avec une mèche de carbone d'allongement 2,1 %



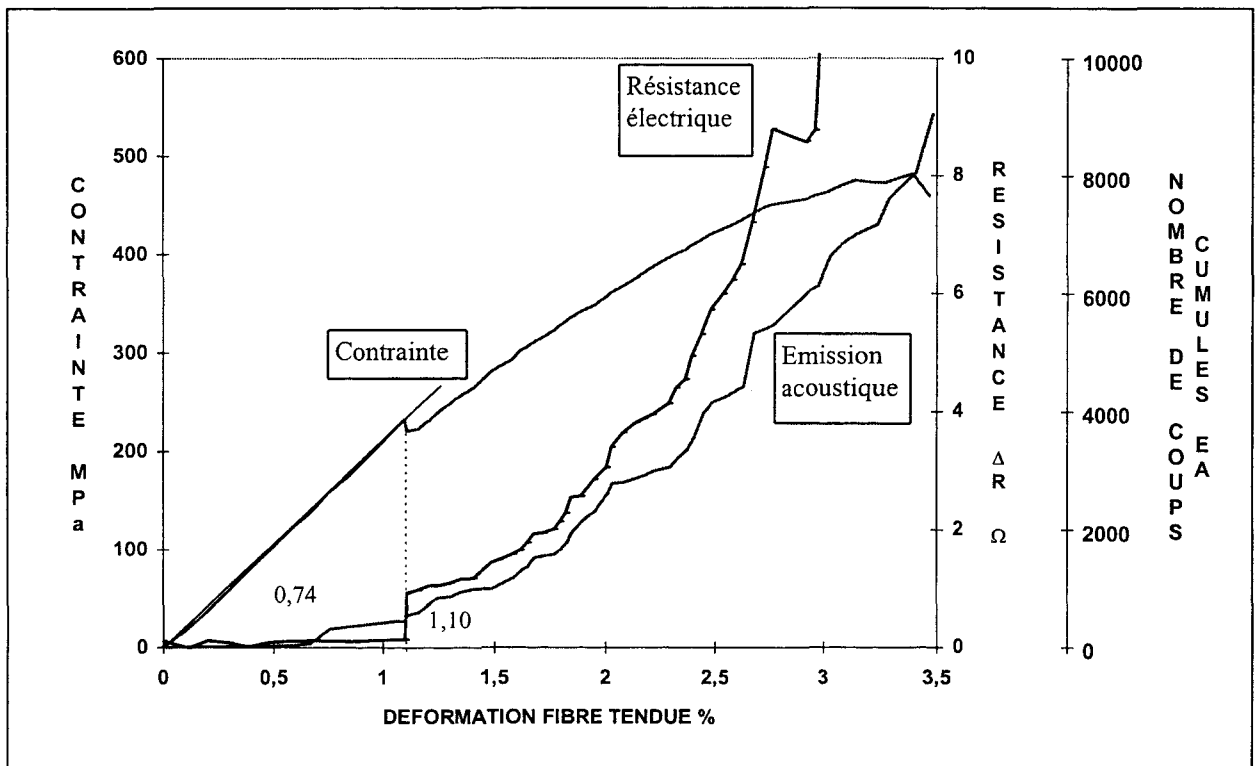
Les essais de flexion trois points sont effectués dans les conditions décrites dans le paragraphe 2-2-4, sur des éprouvettes à renforts 0/90°. La déformation prise en compte ici correspond à la déformation subie au niveau de la mèche de carbone insérée dans l'éprouvette de flexion. La figure 3-26 présente les trois courbes obtenues lors d'un essai de flexion réalisé avec une mèche de carbone d'allongement à la rupture 2,1 % : courbe contrainte/déformation, courbe résistance électrique/déformation et courbe d'émission acoustique. Le coude de la courbe contrainte/déformation intervient pour une déformation de 1,52 % et la courbe d'émission acoustique décolle pour une déformation de 0,85 %. En revanche, le capteur électrique réagit très tardivement et ne donne pas réellement de réponse claire. Une fin de linéarité peut néanmoins être déterminée pour un allongement de 2,75 %, valeur beaucoup trop proche de la déformation correspondante à la ruine du matériau (située à 3,32 %) pour être utilisable. Les fibres carbone de 2,1 % d'allongement à la rupture ne paraissent donc pas être assez sensibles pour détecter correctement les endommagements du composite occasionnés en flexion.

De la même manière sur la figure 3-27 sont présentés les résultats obtenus avec des mèches de carbone d'allongement à la rupture 1,5/1,7 %. La fin de linéarité de la courbe contrainte/déformation intervient pour la même valeur que pour le cas précédent à 1,52 % de déformation. La courbe d'émission acoustique décolle pour une déformation de 0,75 %. La courbe de résistance électrique présente une discontinuité très nette pour une déformation de 1,90 %. La réponse de la mèche de carbone d'allongement 1,5/1,7 % intervient en flexion après les premiers endommagements irréversibles du matériau hôte.



**Fig. 3-27 : Courbes obtenues en flexion sur éprouvette instrumentée avec une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 1,5/1,7 %**

Pour une éprouvette instrumentée avec une mèche de carbone à 0,6 % d'élongation à la rupture (cf. fig. 3-28), le décollement de la courbe d'émission acoustique s'effectue pour une déformation de 0,74 %. Le changement de pente de la courbe contrainte/déformation intervient pour une déformation de 1,10 %, pour la même déformation que la discontinuité de la courbe résistance électrique. La fin de linéarité de la courbe contrainte/déformation qui se traduit par une discontinuité de la contrainte est due aux premières ruptures des fibres de carbone. Le fait que la fin de linéarité de la courbe contrainte/déformation n'intervienne pas avant la réponse du capteur électrique semble montrer que le signal du capteur est donné avant la fin du régime élastique du matériau hôte. Cela est d'ailleurs confirmé par les courbes contrainte/déformation des éprouvettes témoins sans fibre de carbone dont les fins de linéarité ont lieu pour une déformation moyenne de  $1,41 \pm 0,05$  %. Les fibres de carbone d'allongement à la rupture 0,6 % apparaissent donc comme des capteurs satisfaisants pour détecter les endommagements en flexion du matériau, dans les conditions de l'essai réalisé.



**Fig. 3-28 : Courbes obtenues en flexion sur éprouvette instrumentée avec une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 %**

Avec une mèche de carbone d'allongement à la rupture 0,36 %, la discontinuité de la courbe résistance électrique/déformation intervient pour une déformation encore plus faible à 0,85 %. La mèche de carbone 0,36 % permet donc de réaliser, pour les sollicitations en flexion sur le matériau considéré, un capteur d'endommagement préventif qui intervient avec une marge de sécurité supérieure aux mèches d'allongement à la rupture 0,6 %.

Si l'on place sur le même graphique les réponses obtenues pour les différents types de mèches de carbone (cf. fig. 3-29), il apparaît logiquement que plus l'allongement à la rupture des fibres de carbone est faible plus la fin de linéarité des courbes de résistance électrique relative intervient pour une faible déformation.

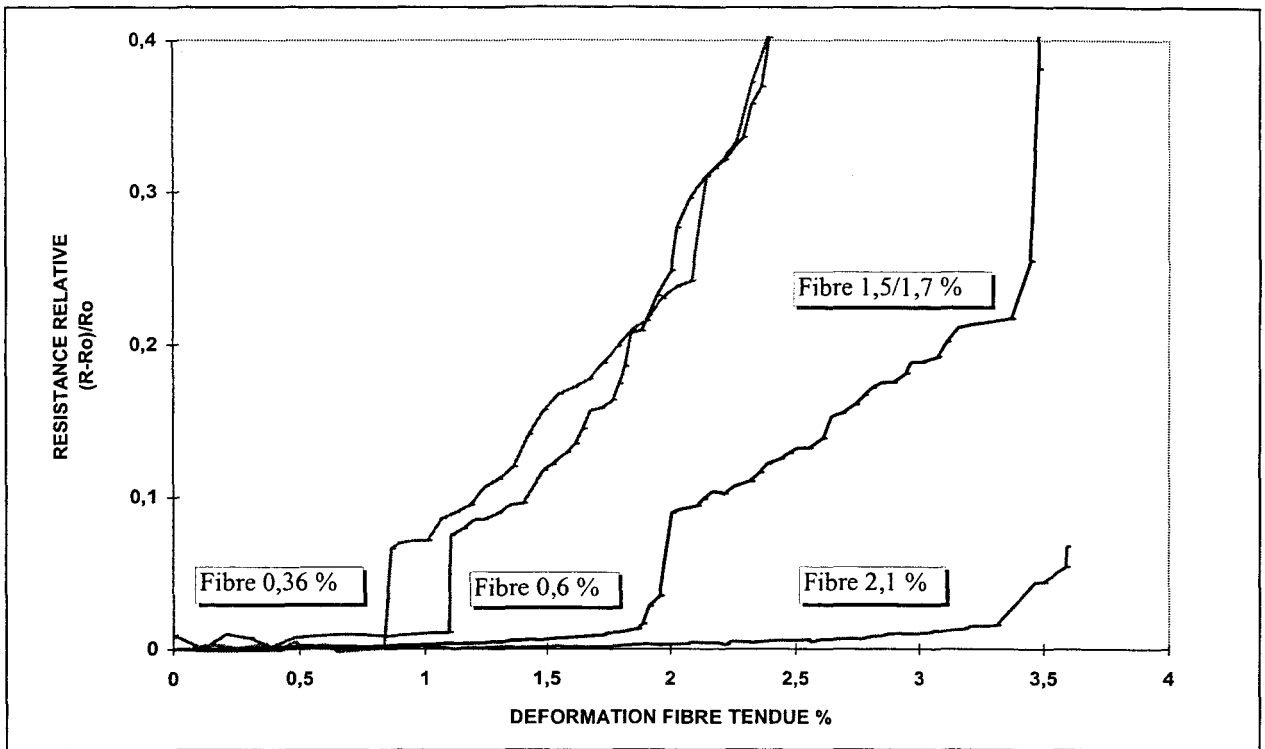


Fig. 3-29 : Comparaison des réponses électriques obtenues avec les différentes mèches de carbone lors des essais de flexion

### 3.2.1.1.2. Interprétation de l'allure des courbes de résistance électrique obtenues en flexion

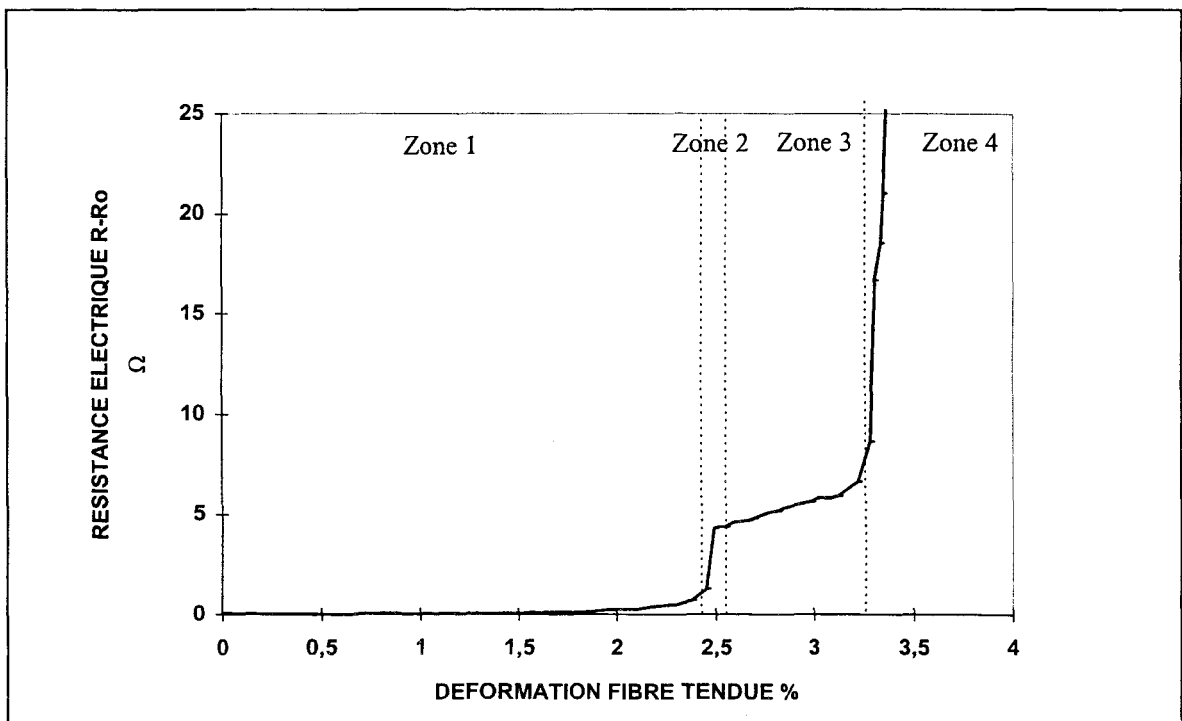


Fig. 3-30 : Différentes zones des courbes résistance électrique/déformation

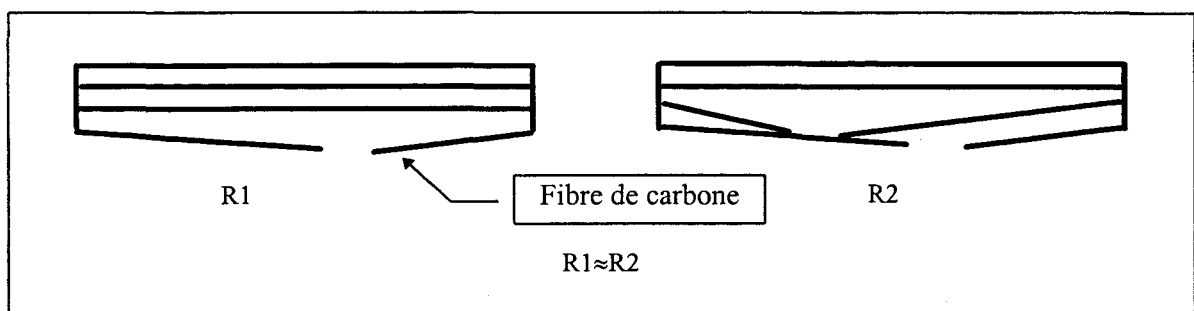
Les courbes de résistance électriques des mèches d'allongement à la rupture de 0,36%, 0,6 % et 1,5/1,7 % présentent schématiquement quatre zones distinctes (cf. fig. 3-30) :

- Une première zone où l'augmentation de la résistance électrique est pratiquement nulle. On se situe avant les premières ruptures des fibres de carbone.
- Une augmentation brusque de la résistance électrique qui se traduit par une discontinuité de la courbe de résistance électrique (zone 2).
- Une troisième zone qui se traduit par une augmentation plus lente de la résistance électrique.
- Enfin, juste avant la rupture de l'éprouvette une augmentation rapide de la résistance électrique (zone 4).

Pour certaines éprouvettes la séparation des zones trois et quatre est bien marquée (cf. fig. 3-27), alors que pour d'autres le passage entre les deux zones se fait de façon plus progressive (cf. fig. 3-28).

L'allure des courbes obtenues en flexion diffère donc de celle des courbes obtenues en traction. Ces dernières ne présentent pas d'une façon aussi marquée la discontinuité initiale lors des toutes premières ruptures de fibres. Elles s'apparentent plus à des courbes exponentielles (jusqu'à un niveau d'augmentation de résistance important, supérieur à 15  $\Omega$ ), pour lesquelles une fois le seuil de rupture dépassé, plus la déformation est importante, plus l'augmentation de résistance électrique est rapide. La différence d'allure entre les courbes obtenues en traction et en flexion peut être expliquée par le fait que pour les essais de traction, plus la déformation est grande, plus les fibres rompues sont écartées les unes des autres. En revanche dans les essais de flexion, en raison de l'épaisseur des mèches de carbone, les fibres de carbone appartenant à différentes couches peuvent se rapprocher les unes des autres, créant ainsi de nouveaux chemins conducteurs entre elles. Ainsi l'augmentation brusque de la résistance électrique (zone 2), juste au commencement de la rupture de la mèche de carbone provient de la rupture des fibres de la couche la plus tendue.

Ensuite la résistance électrique augmente de façon plus lente (zone 3) car les fibres des couches supérieures entrent en contact avec celles des couches inférieures et donc limitent l'augmentation de la résistance électrique. La figure 3-31 illustre comment deux fibres cassées se touchant l'une l'autre peuvent conduire à une résistance électrique pratiquement équivalente à celle obtenue avec une seule fibre coupée. Dans le cas présenté ici schématiquement, on suppose que les fibres de carbone se rompent au droit de défauts inhérents à leur structure, les zones de rupture ne se situant donc pas nécessairement au niveau de la flèche maximale sous la panne centrale.



**Fig. 3-31 : Effet du contact des fibres de carbone entre elles**

A la fin de l'essai de flexion, en raison de leur fléchissement important, les fibres de carbone s'écartent les unes des autres et la résistance électrique augmente de façon plus rapide (zone 4).

### 3.2.1.1.3. Reproductibilité des mesures

Deux essais de flexion menés avec des éprouvettes à 0,6 % d'allongement à la rupture présentent un écart de 0,13 % de déformation entre les discontinuités des courbes de résistance électrique (cf. fig. 3-32). Un écart plus important de 0,35 % est trouvé pour les deux essais menés sur des éprouvettes instrumentées avec des fibres 1,5/1,7 %. La reproductibilité est ici moins bonne que celle des essais de traction. Cela est sans doute dû au fait que la distance entre la mèche de carbone et l'axe neutre de l'éprouvette, qui conditionnent la déformation appliquée aux fibres de carbone en flexion, n'est pas exactement la même pour les différentes éprouvettes, les opérations de mise en oeuvre pouvant générer de légères fluctuations d'épaisseur et de taux de résine.

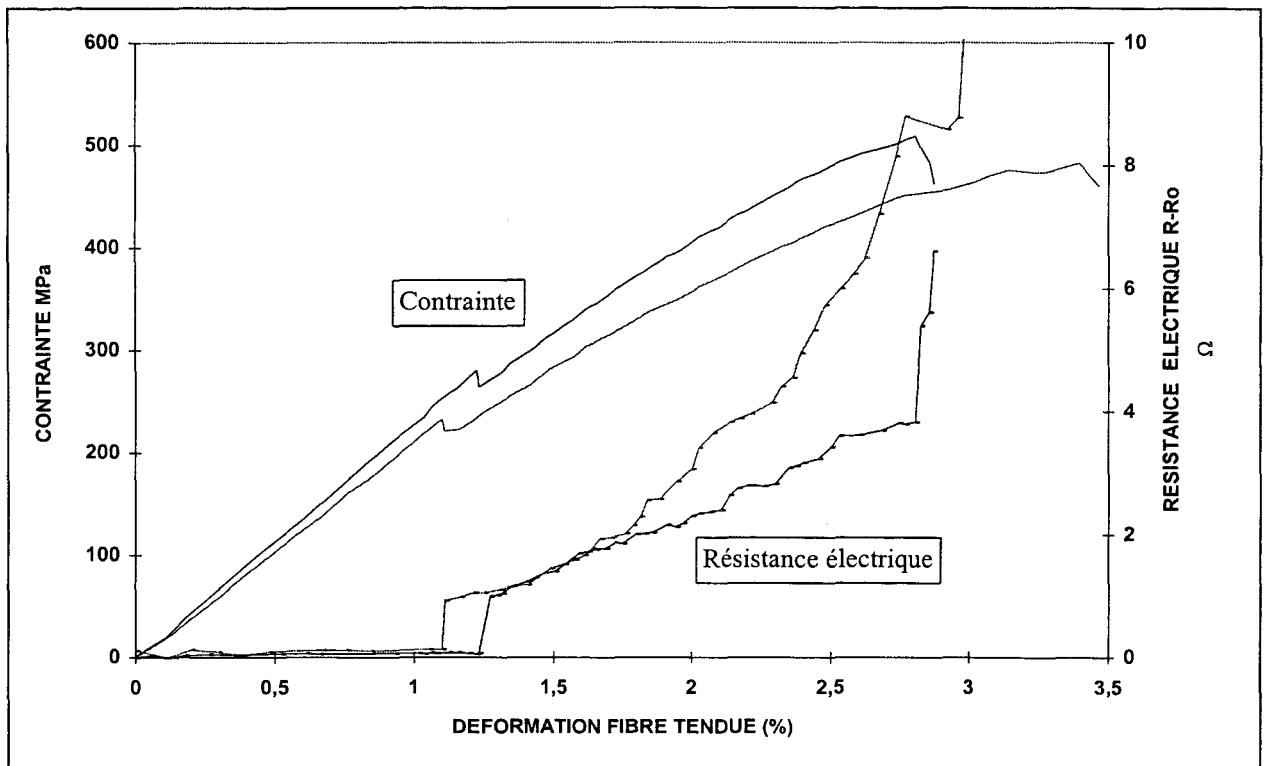


Fig. 3-32 : Reproductibilité des mesures pour des essais de flexion effectués sur des éprouvettes instrumentées avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 %

### 3.2.1.1.4. Influence des capteurs sur le comportement mécanique du matériau hôte

Le tableau 3-8 donne les modules moyens de flexion mesurés sur des éprouvettes témoins sans fibre de carbone et sur les éprouvettes instrumentées avec les différents types de fibres, à raison de trois essais par configuration.

Mèche de carbone	$E_{\text{moyen}}$ (MPa)
Sans mèche	14 784
2,1 % (allongement à la rupture)	17 475
1,5/1,7 %	15 464
0,6 %	18 154

**Tableau 3-8 : Comparaison des modules de flexion**

Il ressort clairement que la présence des fibres de carbone entraîne une augmentation du module de l'éprouvette. La valeur de module plus faible obtenue avec les fibres 1,5/1,7 % par rapport aux deux autres mèches de carbone provient du fait que les mèches 1,5/1,7 % contiennent un nombre moins élevé de filaments (3000 fibres) que les deux autres mèches de carbone (12000 fibres).

### 3.2.1.1.5. Synthèse des essais de flexion

L'étude en flexion montre que les capteurs résistifs intégrés en peau d'éprouvette sont sensibles aux sollicitations de flexion. Ainsi certaines mèches de carbone peuvent être utilisées efficacement pour prévenir les éventuels endommagements engendrés par des contraintes de flexion pour le matériau hôte étudié.

Par ailleurs, il convient de retenir que la réponse électrique des mèches de carbone diffère en fonction de la sollicitation imposée. En effet, les courbes résistance électrique/déformation obtenues en traction (efforts parallèles à la mèche de carbone) et en flexion (efforts perpendiculaires à la mèche) ne présentent pas les mêmes allures, et pour une même déformation exercée au niveau de la mèche de carbone, l'augmentation de la résistance électrique est plus importante pour une sollicitation en traction dans le sens de la mèche que pour une sollicitation en flexion.

D'un point de vue pratique, cela signifie que pour déterminer les caractéristiques de la mèche de carbone à utiliser comme capteur, afin d'obtenir une réponse électrique en corrélation avec l'état d'endommagement du matériau, il convient de connaître préalablement le type de sollicitations auquel sera soumis le matériau hôte.

### 3.2.1.2. Cisaillement interlaminaire

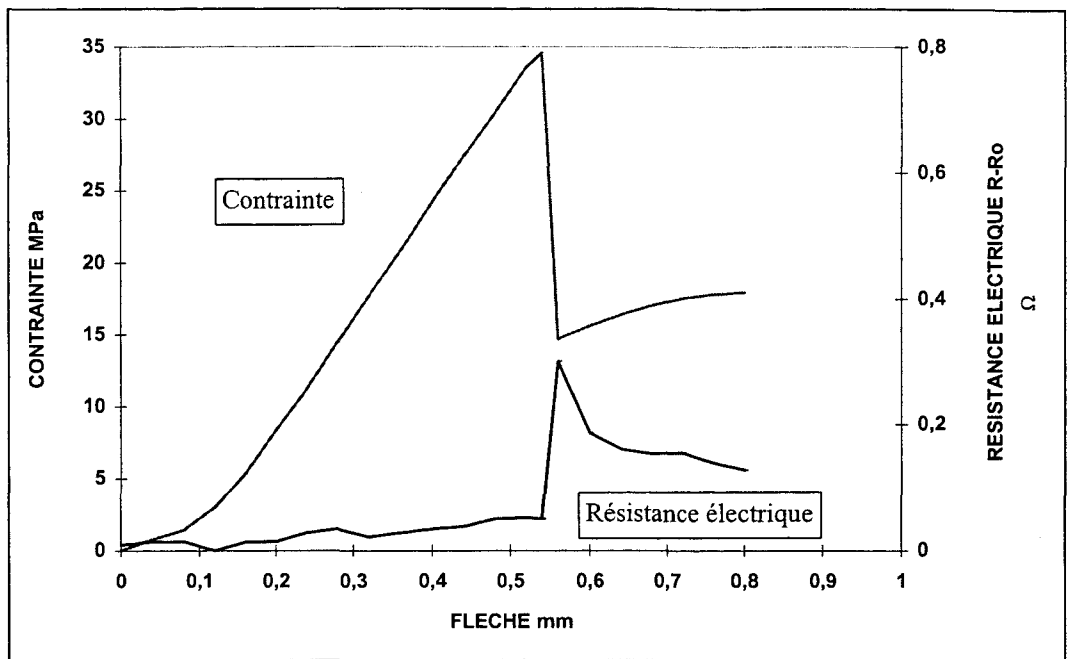
Le cisaillement interlaminaire ou délaminage est l'un des modes d'endommagement le plus fréquent pour les matériaux composites, ce type d'endommagement est aussi difficile à mettre en évidence car peu visible de la surface du matériau. Le principal objectif de cette partie est d'analyser la sensibilité du capteur d'endommagement résistif développé aux phénomènes de délaminage. Un second objectif est de contrôler si l'intégration de la mèche de carbone entre deux plis ne constitue pas un facteur favorisant le délaminage de l'éprouvette.

Les essais de flexion trois point sont ici réalisés sur appuis rapprochés dans les conditions décrites au paragraphe 2-2-5 de manière à accroître le poids des contraintes de cisaillement interlaminaire par rapport aux contraintes normales de flexion. Ainsi en pratique la plupart des éprouvettes testées (90 %) périssent en cisaillement seul. Deux configurations d'instrumentation sont testées ici : les mèches de carbone servant de capteur résistif sont positionnées de manière translaminaire (cf. fig. 2-3) ou interlaminaire (parallèles aux plis et intégrées entre les deux plis centraux de l'éprouvette).

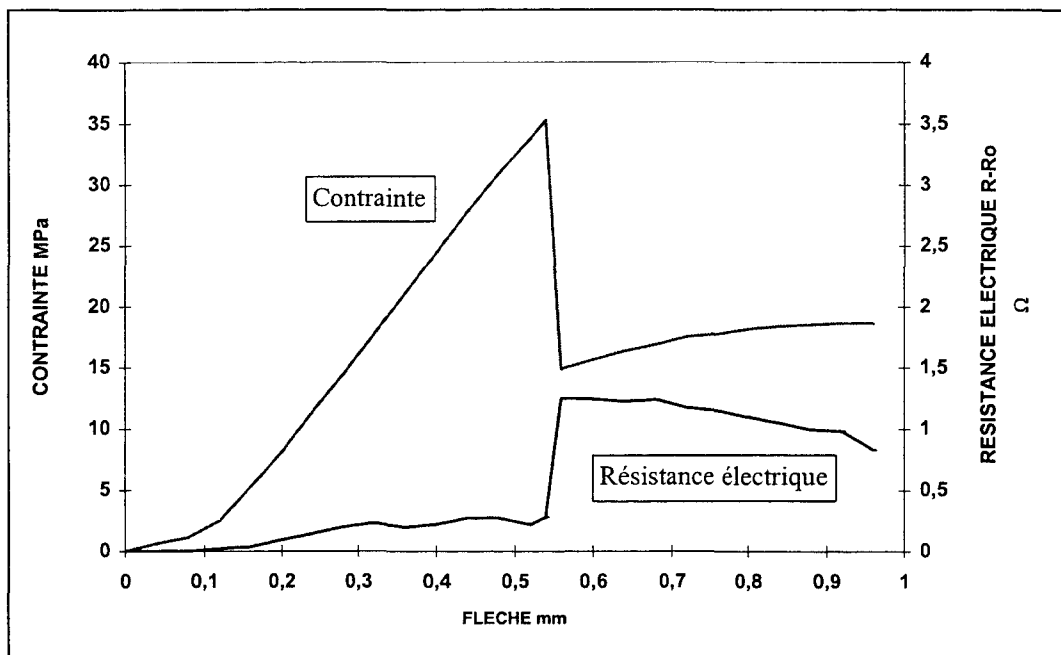
#### 3.2.1.2.1. Mèches de carbone translaminaires

La courbe de résistance électrique de la figure 3-33 présente une augmentation brusque de résistance électrique lorsque se produit le délaminage de l'éprouvette, qui intervient pour une flèche de 0,55 mm et se traduit par une chute brutale de la contrainte de cisaillement. Cependant, l'augmentation de résistance de 0,3  $\Omega$  est beaucoup plus faible que celle à laquelle on pourrait s'attendre pour des mèches de carbone translaminaires, situées perpendiculairement à la zone de délaminage. En effet, le délaminage de l'éprouvette est a priori susceptible d'entraîner la rupture totale de la mèche de carbone. En fait, le problème provient du positionnement du coude de la mèche dans l'éprouvette (partie réellement translaminaire (cf. fig. 2-3)). Celui-ci est placé au milieu de l'éprouvette, juste sous la panne centrale alors que l'expérience montre que le délaminage n'affecte qu'une moitié de l'éprouvette. Cette zone à droite ou à gauche de la panne centrale ne peut pas être déterminée préalablement. La partie sensible du capteur (fibres perpendiculaires aux plis) se trouve donc à la limite de la zone délaminée, la mèche de carbone est donc seulement partiellement rompue. Ce problème soulève le principal défaut de la fibre translaminaire, qui est un capteur de délaminage ponctuel, ne réagissant que si le délaminage intervient exactement au niveau de la position du coude de la mèche de carbone.

Pour l'essai effectué avec une mèche d'allongement à la rupture de 1,5/1,7 %, l'augmentation de résistance électrique obtenue est plus conséquente environ 1  $\Omega$ , mais les tendances générales de comportement sont conservées.



**Fig. 3-33 : Courbes obtenues lors d'un essai en cisaillement avec une mèche de carbone translaminaire d'allongement à la rupture de 0,6 % (flexion 3 points en appuis rapprochés)**



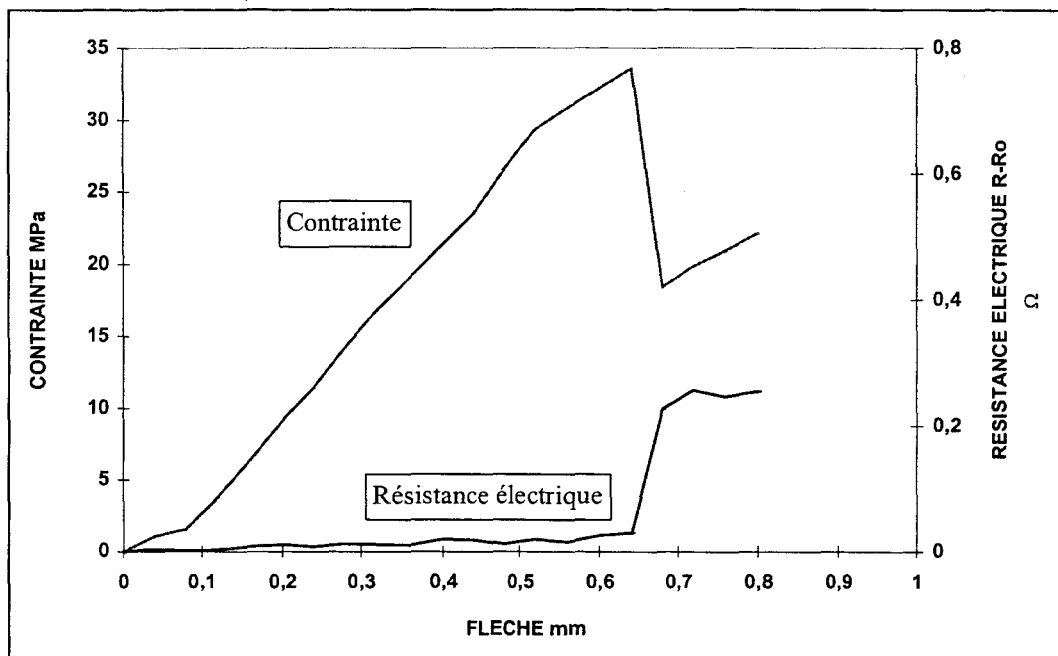
**Fig. 3-34 : Courbes obtenues lors d'un essai en cisaillement avec une mèche de carbone translaminaire d'allongement à la rupture de 1,5/1,7 % (flexion 3 points en appuis rapprochés)**



### 3.2.1.2.2. Mèches de carbone parallèles aux plis de l'éprouvette

La figure 3-35 présente les courbes obtenues lors d'un essai de cisaillement, courbes de la contrainte et de la résistance électrique du capteur en fonction de la flèche de l'éprouvette. Sur la courbe de contrainte en fonction de la flèche une chute brutale de la contrainte intervient pour une flèche de 0,65 mm, qui correspond au délaminage de l'éprouvette. La courbe de la résistance électrique en fonction de la déformation montre que le capteur réagit lors du délaminage par une augmentation de la résistance électrique de l'ordre de 0,25  $\Omega$ .

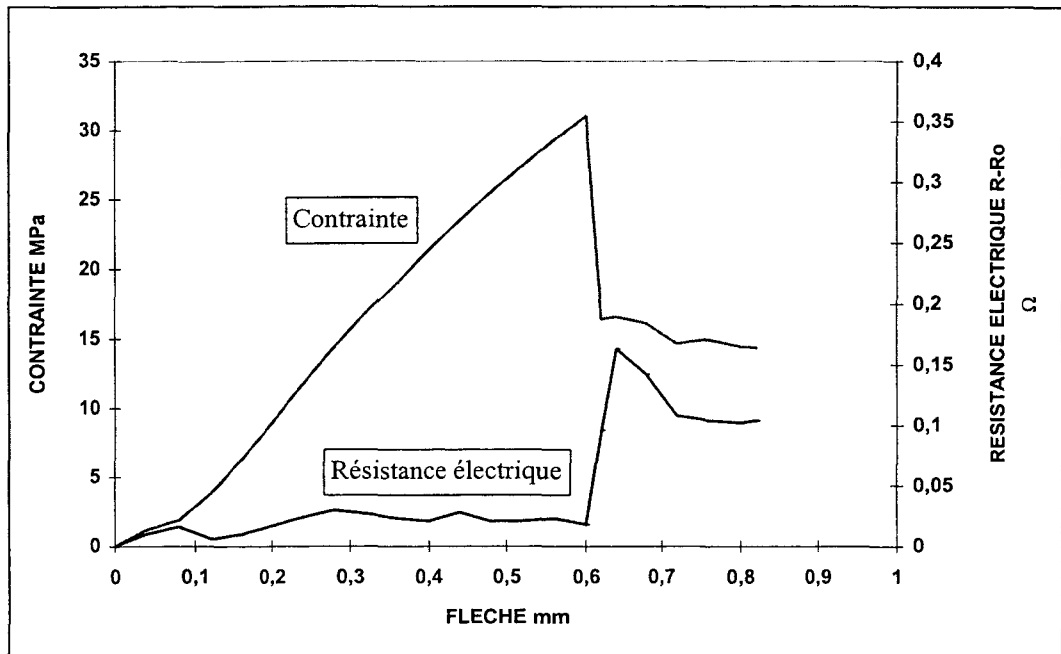
L'augmentation de la résistance électrique des fibres de carbone qui survient lors du délaminage de l'éprouvette peut être expliquée par la rupture des fibres de carbone. Les mèches de carbone étant situées parallèlement aux plis de l'éprouvette au niveau du plan neutre, elles ne devraient subir qu'une force de cisaillement parallèle à leur axe qui ne devrait pas entraîner leur rupture. Cependant, il semble évident que toutes les fibres de la mèche de carbone ne sont pas rigoureusement parallèles au plan des plis de l'éprouvette. Lors du délaminage des deux plis entre lesquels la mèche de carbone est insérée, la fissure interpli entraîne donc la rupture de certaines fibres de carbone. De plus, il se peut que l'on ne soit pas complètement en mode de cisaillement pur, et que des forces de traction s'exercent aussi sur la mèche lors du délaminage, et favorisent ainsi les ruptures de fibres de carbone.



**Fig. 3-35 : Courbes obtenues lors d'un essai en cisaillement avec une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 % (flexion 3 points en appuis rapprochés)**

On notera par ailleurs que contrairement aux essais de flexion ou de traction au cours desquels la résistance électrique augmente continuellement, une fois le seuil de sensibilité du capteur franchi, pour les essais de cisaillement après la première réponse du capteur, la résistance électrique entre dans une phase stationnaire ou a même tendance à légèrement baisser.

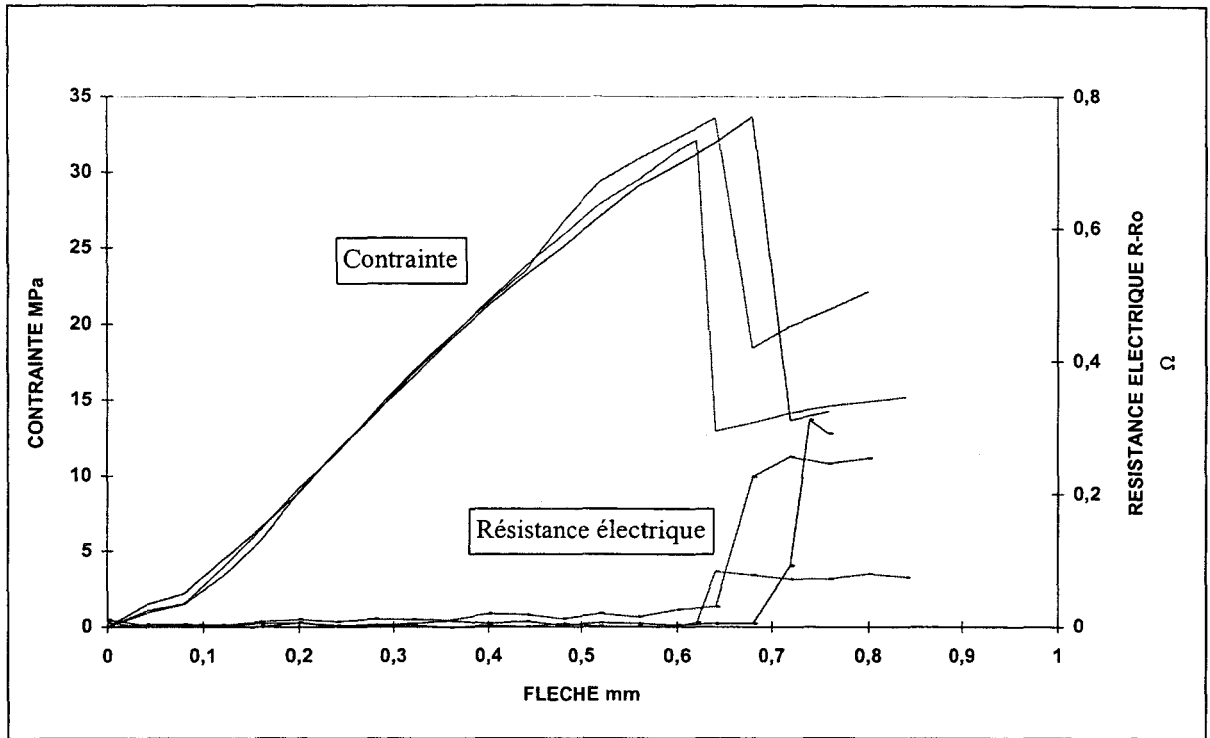
La figure 3-36 montre les résultats obtenus avec une mèche de carbone de déformation 1,5/1,7 %. La réponse du capteur intervient pour des valeurs de flèche similaires à celles obtenues pour les mèches de carbone précédentes, à la flèche correspondant au délaminage de l'éprouvette.



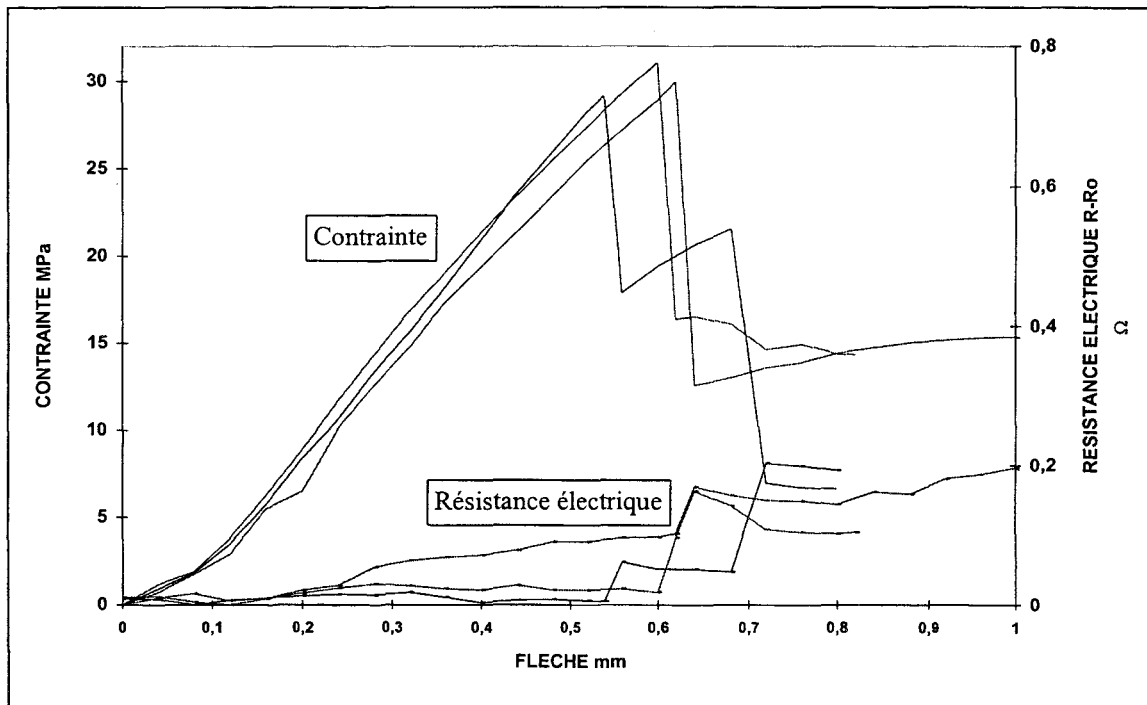
**Fig. 3-36 : Courbes obtenues lors d'essais en cisaillement avec une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 1,5/1,7 % (flexion 3 points en appuis rapprochés)**

Pour les essais de cisaillement, contrairement aux essais de flexion et de traction le niveau de déformation correspondant à la première réponse électrique des mèches de carbone n'est pas directement corrélé à l'allongement à la rupture des mèches de carbone utilisées. En effet, la réponse du capteur électrique intervient ici pour la même flèche, correspondant au délaminage de l'éprouvette pour les deux types de mèche de carbone utilisées. L'augmentation de résistance électrique des mèches d'allongement à la rupture 1,5/1,7 % se situe en moyenne entre 0,1 et 0,3 Ω comme pour les mèches de carbone précédentes.

Les figures 3-37 et 3-38 présentent les résultats obtenus sur trois éprouvettes identiques afin d'apprécier la reproductibilité des réponses pour les deux types de mèches de carbone étudiées. L'écart des flèches (0,06 mm), identique dans les deux cas, pour lesquelles interviennent les réponses des différents capteurs est lié au décalage entre l'amorçage des délaminages des différentes éprouvettes. En revanche, une différence importante de l'augmentation de la résistance électrique est constatée entre les différentes mèches de carbone. Pour la majorité des éprouvettes une augmentation de l'ordre de 0,1 à 0,3 Ω est relevée, cependant dans certains cas la hausse de résistance électrique peut être plus importante (supérieure à 1 Ω).



**Fig. 3-37 : Reproductibilité des mesures pour des essais en cisaillement pour des éprouvettes instrumentées avec des mèches de carbone d'allongement à la rupture 0,6 % (flexion 3 points en appuis rapprochés)**

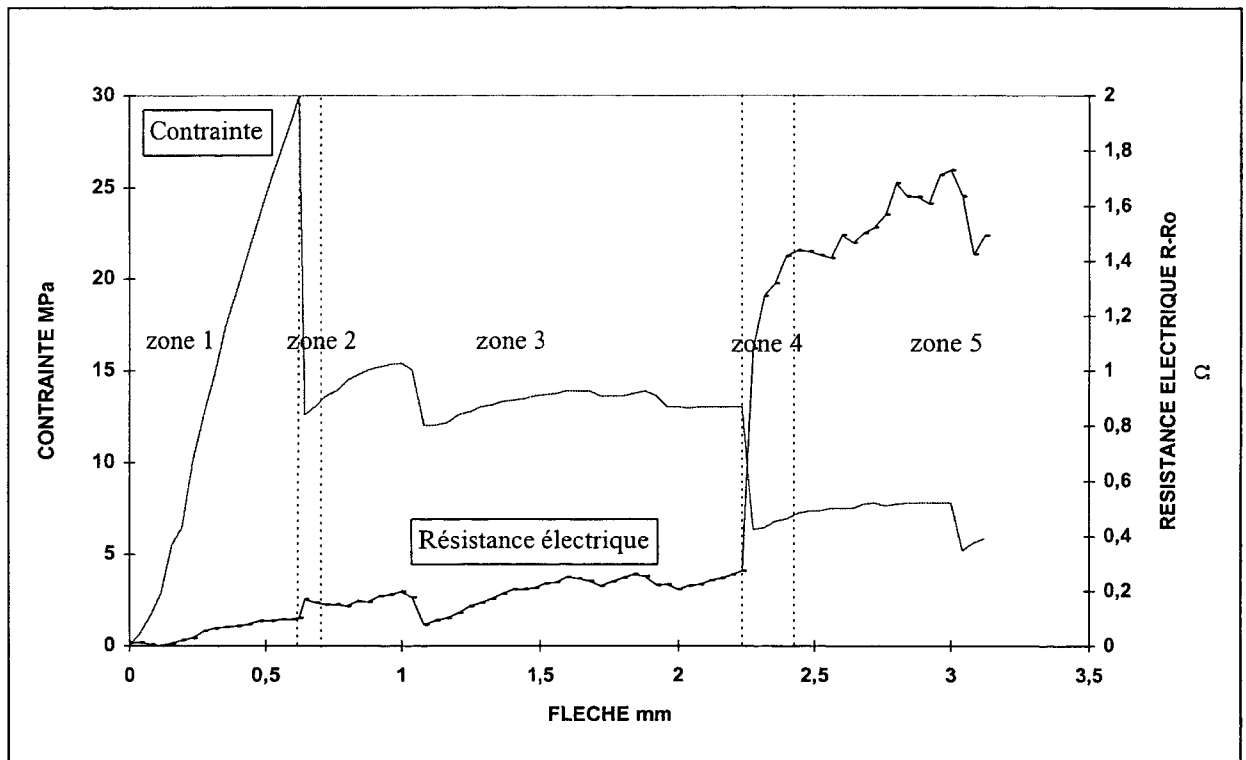


**Fig. 3-38 : Reproductibilité des mesures pour des essais en cisaillement pour des éprouvettes instrumentées avec des mèches de carbone d'allongement à la rupture de 1,5/1,7 % (flexion 3 points en appuis rapprochés)**

La figure 3-39 présente les résultats d'un essai de cisaillement poursuivi après le premier délaminage jusqu'à un niveau de flèche de 3,5 mm. La courbe résistance électrique en fonction de la flèche laisse alors apparaître plusieurs zones caractéristiques :

- zone 1 : faible augmentation de la résistance électrique
- zone 2 : discontinuité de la courbe correspondant au premier délaminage de l'éprouvette (chute de la contrainte de cisaillement)
- zone 3 : résistance électrique globalement stationnaire (la courbe de résistance électrique semble suivre la courbe de contrainte)
- zone 4 : nouvelle discontinuité correspondant à un renforcement du délaminage (l'amplitude de la réponse du capteur est beaucoup plus importante que lors du premier délaminage)
- zone 5 : augmentation de la résistance électrique.

Dans les zones 3 et 5, certaines baisses de contrainte entraînent une chute de la résistance électrique de la mèche de carbone. En effet dans certains cas, une chute de contrainte peut entraîner le rapprochement des fibres de carbone déjà rompues entre elles et ainsi recréer des contacts électriques. L'étude de la courbe de résistance électrique après les premières ruptures des fibres permet donc de déterminer, si la baisse de contrainte est due à un phénomène de cisaillement au niveau de la mèche de carbone (augmentation de la résistance électrique par rupture de fibres de carbone) ou un phénomène de compression au niveau de la mèche de carbone (baisse de la résistance électrique par rapprochement des fibres de carbone entre elles).



**Fig. 3-39 : Courbes obtenues lors d'essais en cisaillement avec une mèche de carbone de déformation à la rupture de 1,5/1,7 % (flexion 3 points en appuis rapprochés)**

Bien que l'augmentation de la résistance électrique des mèches de carbone parallèles aux plis lors du délaminage de l'éprouvette soit a priori peu conforme aux attentes et

proviennent de l'imperfection (par ailleurs inévitable) de l'orientation des différentes fibres par rapport au plan des plis, les essais réalisés montrent qu'elles constituent de bons détecteurs de délaminages pour les matériaux composites. Elles sont de plus beaucoup plus simples à mettre en oeuvre que les mèches translaminaires.

### 3.2.1.2.3. Influence de l'intégration des mèches de carbone sur la résistance au délaminage de l'éprouvette

Les valeurs moyennes de la contrainte de cisaillement à la rupture pour les éprouvettes témoins et les éprouvettes instrumentées avec des mèches de carbone (cf. tableau 3-9) montrent que l'intégration des mèches de carbone ne favorise pas le délaminage de l'éprouvette puisque les valeurs de contrainte de cisaillement moyennes sont légèrement plus élevées pour les éprouvettes avec mèches de carbone. La surépaisseur créée par l'intégration de la mèche de carbone ne constitue donc pas un facteur d'amorçage de délaminage; ceci est dû au faible diamètre des fibres de carbone de l'ordre de 10  $\mu\text{m}$ .

	Mèche de carbone (Al. à la rupture)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	$F_{\text{max}}$ (daN)	$\tau_{13}$ (daN/mm <sup>2</sup> )
Moy. (écart type)	0,6 %	14,02 (0,25)	3,62 (0,02)	216,50 (10,32)	3,20 (0,17)
Moy. (écart type)	1,5/1,7 %	14,36 (0,46)	3,59 (0,02)	214,33 (6,48)	3,12 (0,07)
Moy. (écart type)	Sans mèche	15,12 (0,25)	3,63 (0,04)	217,80 (7,74)	3,05 (0,13)

**Tableau 3-9 : Résistance au cisaillement obtenue lors d'essais en flexion trois points en appuis rapprochés**

### 3.2.1.2.4. Synthèse des essais de cisaillement interlaminaire

L'étude en cisaillement montre que la mèche de carbone servant de capteur d'endommagement est sensible au délaminage de l'éprouvette, aussi bien pour des mèches de carbone intégrées parallèlement ou perpendiculairement aux plis. En pratique, l'intégration de mèches parallèles aux plis sera préférée à cause de sa mise en oeuvre plus simple.

Pour ce type de sollicitation le premier endommagement par délaminage de l'éprouvette ainsi que celui de la mèche de carbone interviennent en même temps, pour les deux types de mèches utilisés. L'adaptation des caractéristiques du capteur résistif aux lois de comportement du matériau hôte ne paraît donc pas aussi indispensable dans le cas du délaminage que pour les sollicitations en traction et flexion vues précédemment.

Les principales sollicitations statiques étant passées en revue, nous allons maintenant étudier la réponse des capteurs résistifs sous sollicitations dynamiques qui sont plus représentatives des contraintes subies par une pièce industrielle composite en service.

### 3.2.2. Chargement dynamique

L'expérience montre que les pièces en composite, correctement dimensionnées en statique pour une contrainte critique maximale donnée, périssent fréquemment sous sollicitations répétées ou dynamiques après un nombre important de cycles, alors que la contrainte critique n'est jamais dépassée. Il convient donc d'analyser dans quelle mesure le capteur d'endommagement développé ici est susceptible de répondre aux contraintes imposées par de telles lois de chargement.

#### 3.2.2.1. Chargement répété progressif

Ce type de chargement est destiné à vérifier l'existence d'une certaine mémoire de l'effet des déformations pour le type de capteur développé, sa simple fonction de capteur de déformation en cours de sollicitation étant banale.

##### 3.2.2.1.1. Résultats pour différents types de mèches de carbone

Les essais de traction en chargement répété progressif sont effectués à des vitesses de chargement et déchargement de l'éprouvette de 1 mm/min., avec une augmentation de la déformation maximale imposée de 0,1 % d'un cycle au suivant, sur une plage de 0 à 2 % de déformation. Pour chaque type de mèches de carbone, cinq essais en chargement répété sont effectués afin d'apprécier la reproductibilité des mesures. Des mesures d'émissions acoustiques sont également réalisées.

###### 3.2.2.1.1.1. Fibres de carbone d'allongement à la rupture de 1,5/1,7 %

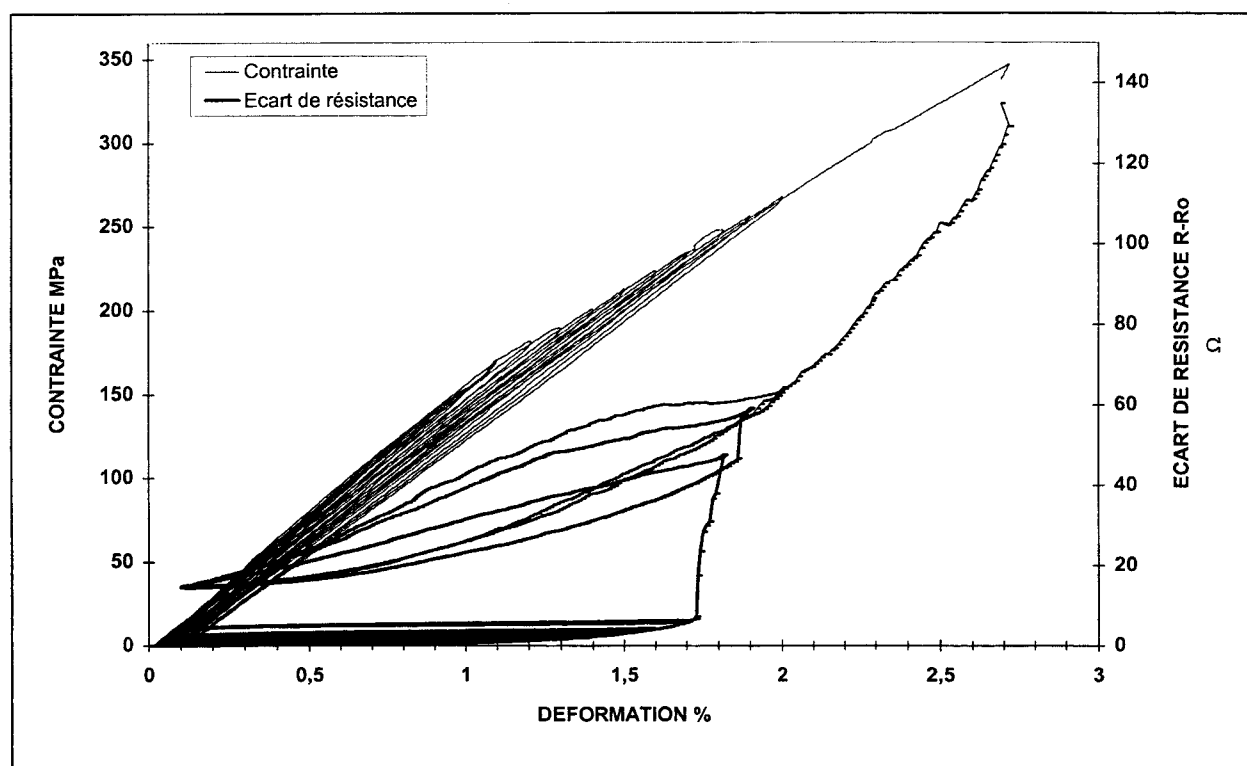
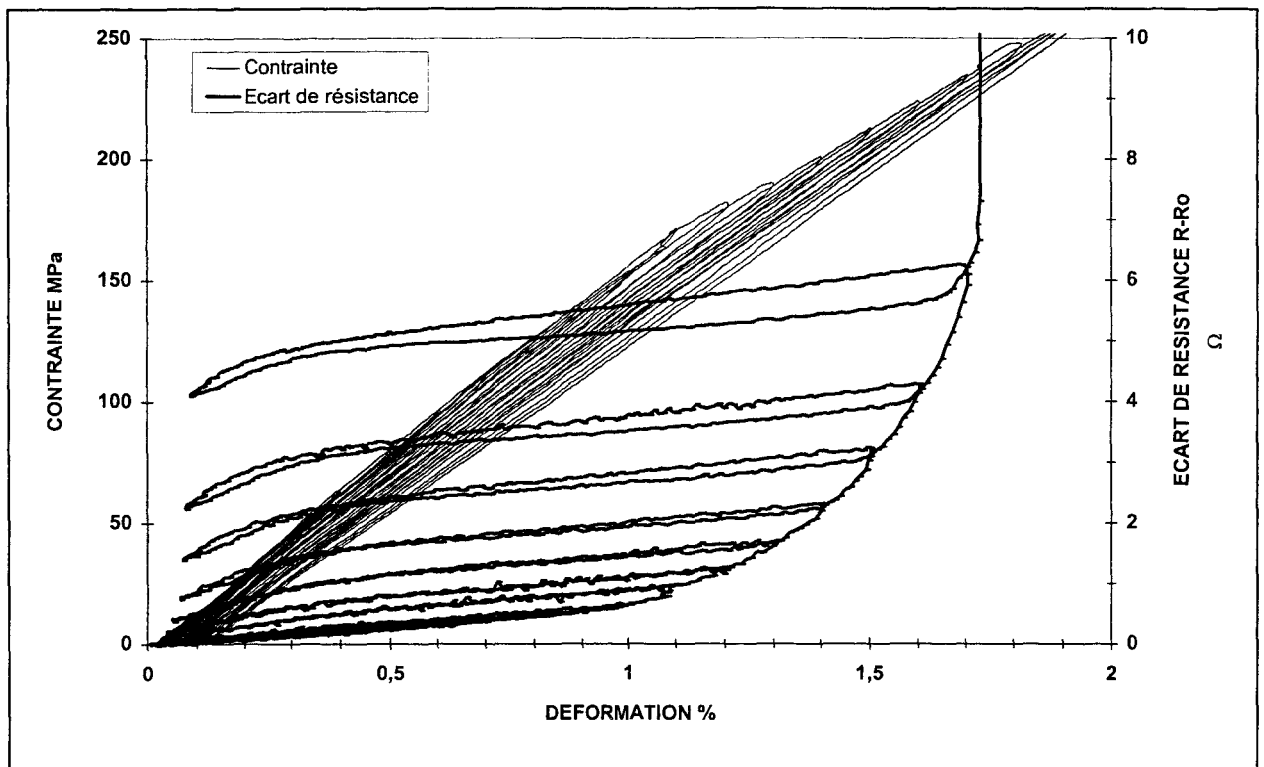


Fig. 3-40 : Chargement répété progressif (fibres 1,5/1,7 %)

La figure 3-40 présente les courbes de contrainte et d'écart de résistance électrique ( $R-R_0$ ) en fonction de la déformation. Les courbes contrainte/déformation voient leur pente diminuer d'un cycle à l'autre, à cause de l'endommagement progressif de l'éprouvette qui se traduit par une chute de son module. Après une déformation supérieure à 1,7 %, une rupture critique de la mèche de carbone intervient (rupture de plus de 35 % des fibres de carbone), ce qui se traduit par une augmentation brutale de la résistance électrique. A ce niveau de déformation, lorsque la structure est totalement déchargée, la résistance électrique reste beaucoup plus élevée que la résistance initiale : il subsiste donc une résistance électrique résiduelle. La baisse de résistance électrique qui accompagne le déchargement de l'éprouvette est due à la remise en contact partielle des fibres de carbone rompues entre elles. Cependant cette remise en contact n'est pas totale et la rupture des fibres de carbone entraîne donc une augmentation de la résistance électrique même lorsque la contrainte s'annule.



**Fig. 3-41 : Chargement répété progressif (zoom sur les faibles écarts de résistance électrique)**

La figure 3-41 correspond à un zoom de la figure précédente sur les faibles écarts de résistance électrique. Une première résistance électrique résiduelle non nulle apparaît pour une déformation maximale de 1,1 %, déformation correspondant aux premières ruptures des fibres de la mèche de carbone. Avant 1,1 % de déformation, lors de l'augmentation de la résistance électrique due à l'élongation des fibres de carbone, aucune résistance électrique résiduelle n'est mise en évidence, ce qui souligne le caractère réversible de l'augmentation de résistance électrique due à l'élongation des fibres de carbone, alors que l'augmentation de la résistance électrique due à leur rupture est en partie irréversible.

La courbe d'émission acoustique en fonction de la déformation obtenue pour un essai de chargement répété (cf. fig. 3-42) permet de mettre en évidence que le matériau ne vérifie

plus l'effet Kaiser à partir d'un certain niveau de contrainte (140 MPa). L'effet Kaiser traduit l'irréversibilité de l'émission acoustique d'un matériau soumis à une sollicitation. Il correspond à l'absence d'émission acoustique observée lorsqu'un matériau porté à un niveau donné de sollicitation est déchargé puis rechargé, tant que la sollicitation reste inférieure à la valeur maximale  $C_{max}$  précédemment atteinte. Lorsque l'effet Kaiser n'est plus vérifié, on parle alors d'effet Felicity. La reprise de l'émission acoustique se manifeste dans ce cas à une valeur de la contrainte  $C$  inférieure à la valeur de contrainte maximale précédemment atteinte. L'effet Felicity provient de la nature viscoélastique de la matrice et de la redistribution des contraintes internes dans le matériau composite lors des cycles de chargement/déchargement. Bien que les explications physiques de l'effet Felicity restent limitées, cet effet traduit la quantité d'endommagement du matériau qui peut apparaître et se développer pendant sa mise sous contrainte. Dans le cas présent, l'effet Felicity apparaît à partir d'une contrainte de 140 MPa correspondant à 0,9 % de déformation, ce qui confirme l'endommagement du matériau pour ce niveau de déformation. De plus l'augmentation du rapport Felicity, défini par  $C/C_{max}$ , pour des niveaux de contraintes maximales plus importants permet de suivre le niveau d'endommagement de l'éprouvette.

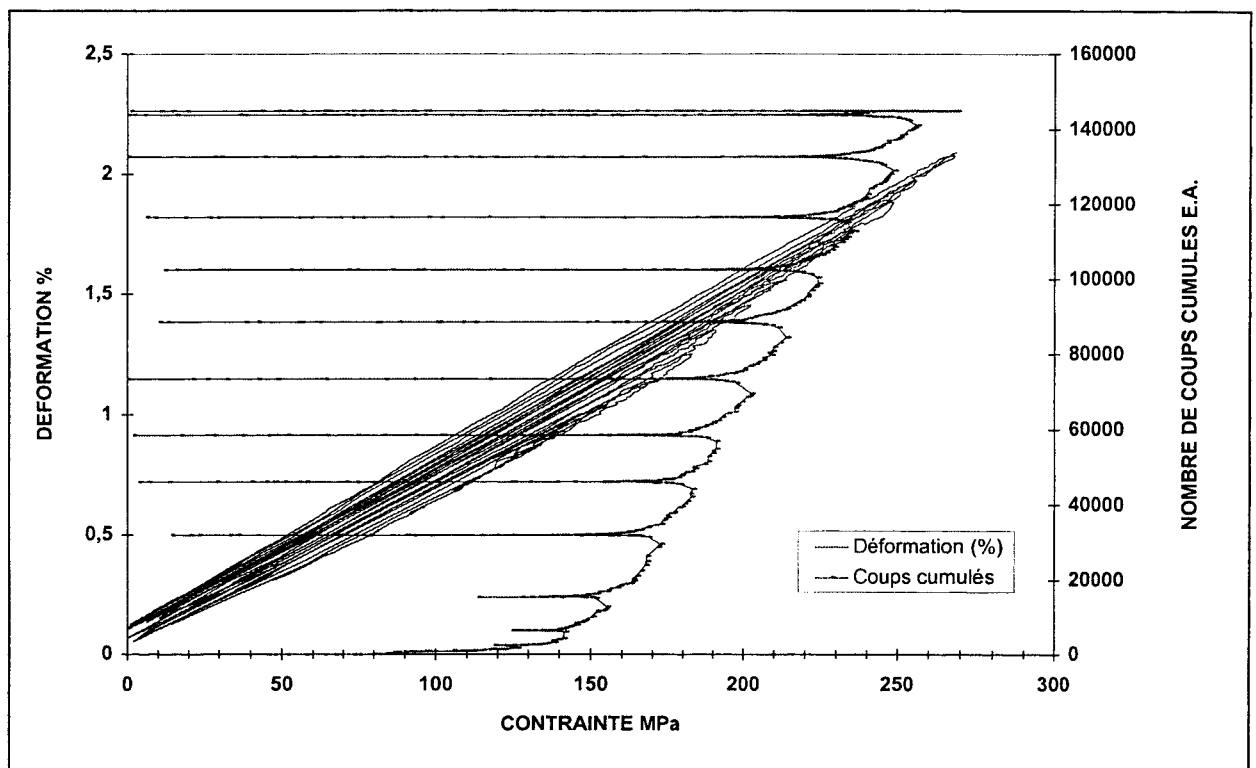
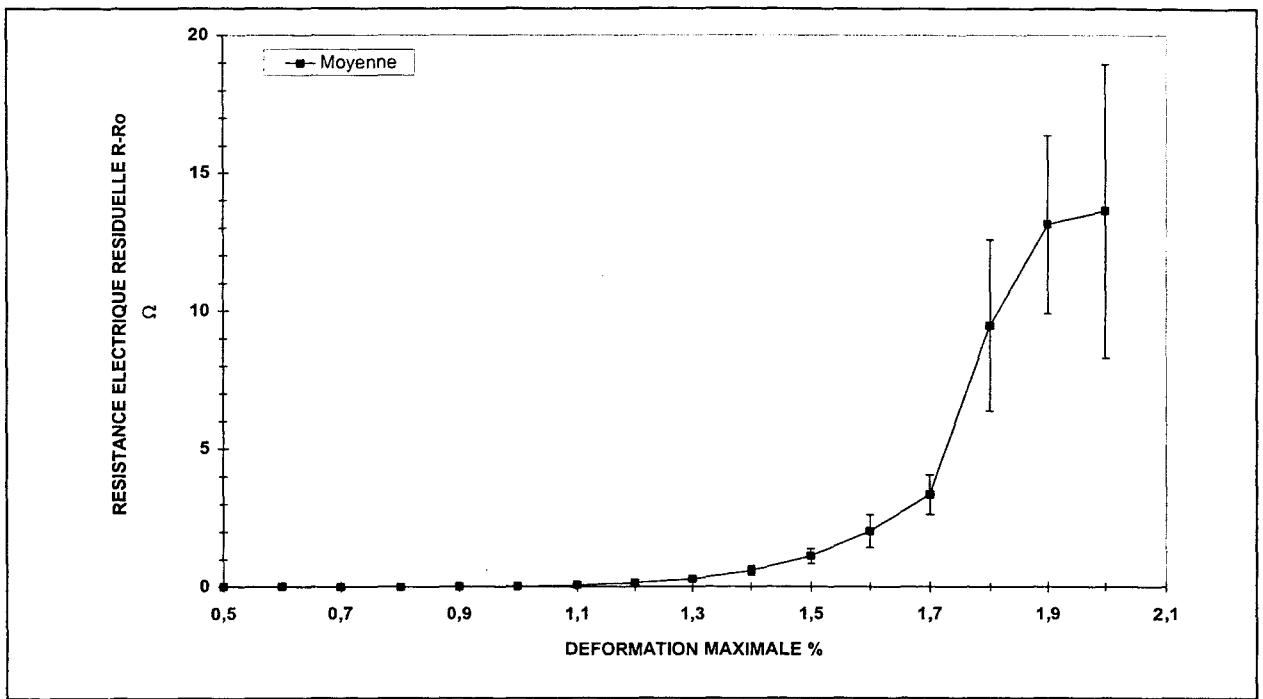


Fig. 3-42 : Courbe d'émission acoustique lors d'un chargement répété progressif

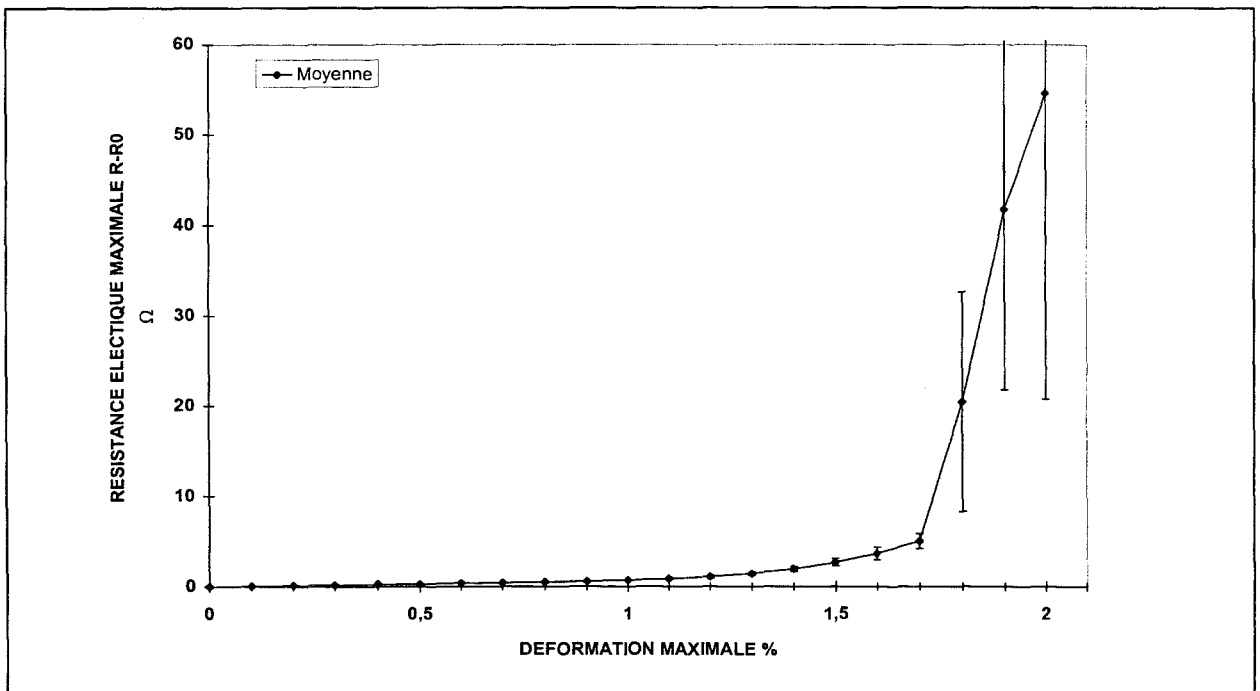
La figure 3-43 présente la résistance électrique résiduelle (résistance obtenue quand la contrainte est annulée) en fonction de la déformation maximale précédemment exercée sur l'éprouvette (courbe moyenne obtenue sur cinq essais). Une première valeur non nulle significative est obtenue pour une déformation maximale de 1,2 %. Les valeurs de la résistance électrique résiduelle sont reproductibles jusqu'à une déformation maximale de 1,7 % et divergent ensuite. Pour les fortes déformations, l'écart de la résistance électrique résiduelle a tendance à s'infléchir, ce qui peut être expliqué en partie par l'augmentation plus faible de la résistance électrique maximale à partir de 1,9 % de déformation (cf. fig. 3-44).





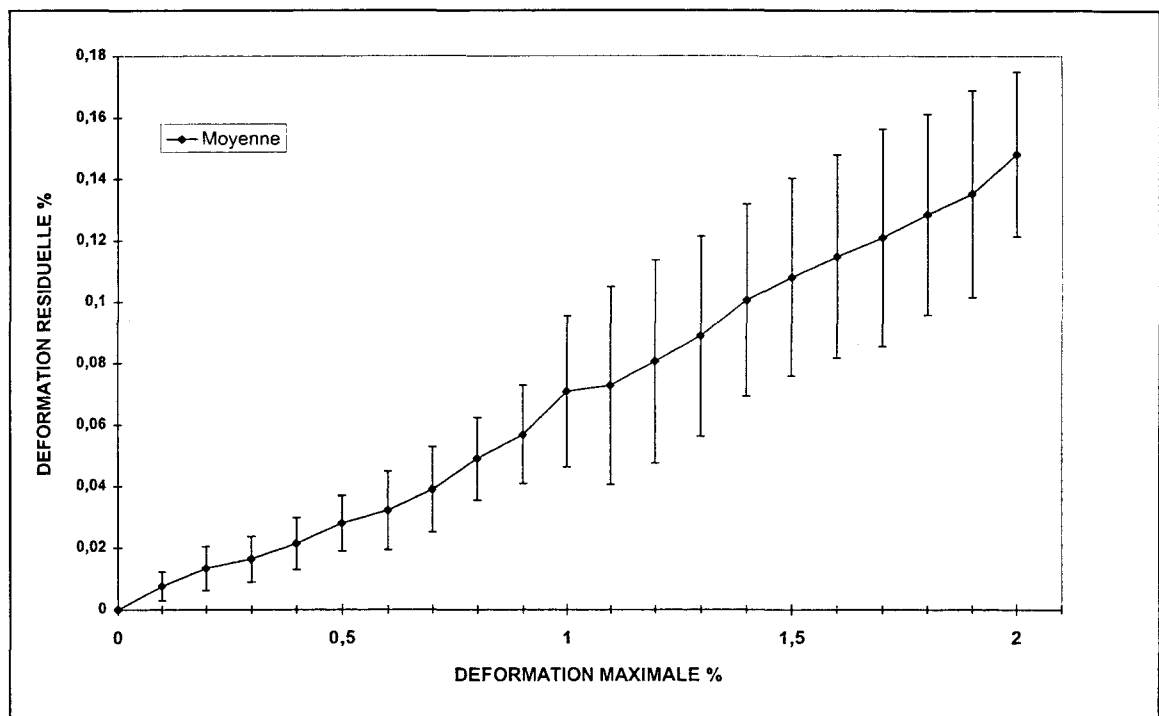
**Fig. 3-43 : Résistance électrique résiduelle moyenne en fonction de la déformation maximale atteinte précédemment (fibres 1,5/1,7 %)**

Afin d'analyser quels sont les facteurs déterminant l'augmentation de la résistance électrique résiduelle, les courbes moyennes de la résistance électrique maximale en fonction de la déformation maximale (fig. 3-44) ainsi que celles de la déformation résiduelle en fonction de la déformation maximale (fig. 3-45) sont étudiées.



**Fig. 3-44 : Résistance électrique maximale en fonction de la déformation maximale (fibres 1,5/1,7 %)**

La courbe de résistance électrique maximale en fonction de la déformation maximale (cf. fig. 3-44) a sensiblement la même allure que la courbe résistance électrique résiduelle/déformation. La valeur de la résistance électrique résiduelle est donc directement liée à la valeur de résistance électrique maximale. Ce qui paraît logique, car plus le nombre de fibres de carbone rompues est important, plus la section de la mèche de carbone sera faible, même si un contact électrique partiel se fait à nouveau entre certaines fibres de carbone coupées, lors de la suppression de la contrainte appliquée. La résistance électrique résiduelle est également favorisée par l'apparition d'une déformation résiduelle de l'éprouvette qui est globalement linéaire en fonction de la déformation maximale atteinte précédemment (cf. fig. 3-45). Cette déformation résiduelle reste très faible, de l'ordre de 0,1 % de déformation pour une déformation maximale de 1,5 % mais permet néanmoins d'empêcher la remise en contact totale des fibres de carbone rompues entre elles.



**Fig. 3-45 : Déformation résiduelle en fonction de la déformation maximale (fibres 1,5/1,7 %)**

Les figures 3-46 et 3-47 montrent l'évolution de la résistance électrique résiduelle en fonction de la déformation résiduelle et de la résistance électrique maximale. Les courbes de la résistance électrique résiduelle en fonction de la résistance électrique maximale sont nettement plus reproductibles que les courbes de résistance électrique résiduelle en fonction de la déformation résiduelle. Cela incite à penser que c'est la résistance électrique maximale atteinte précédemment qui conditionne la résistance électrique résiduelle alors que la déformation résiduelle constitue un facteur secondaire.

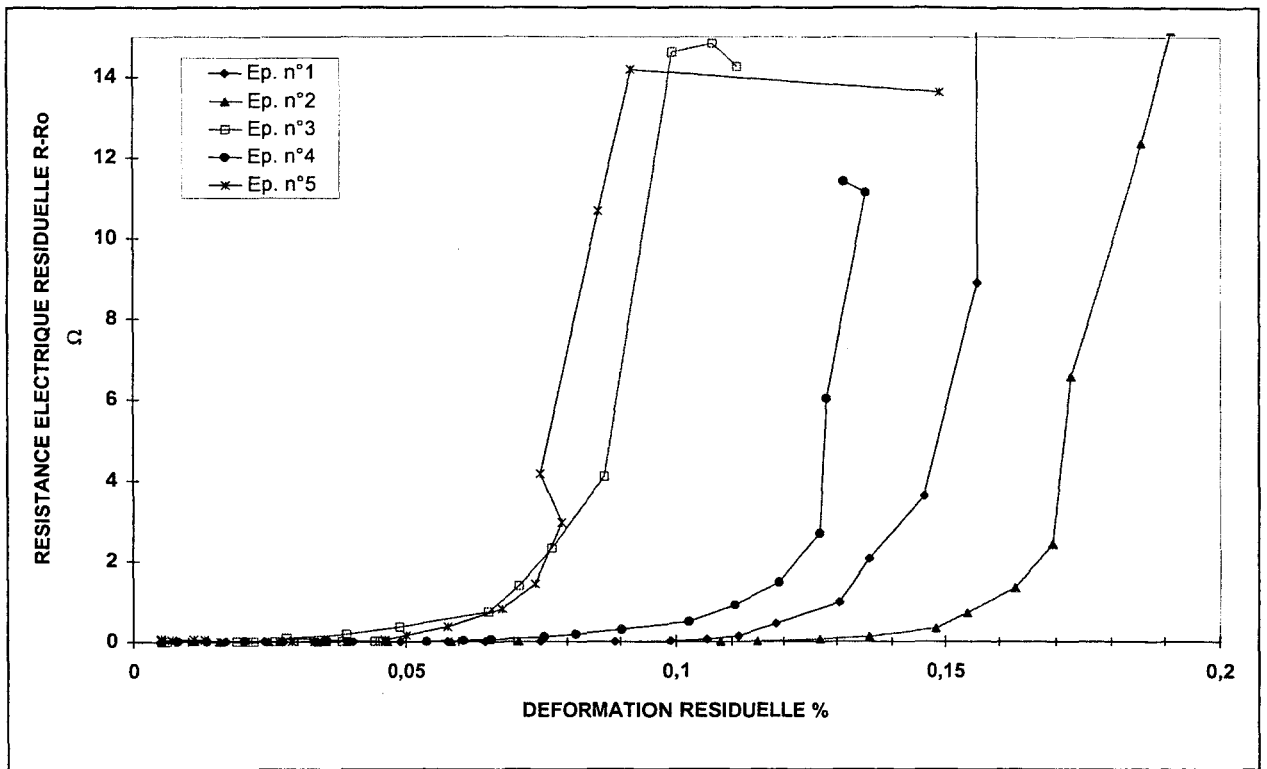


Fig. 3-46 : Résistance électrique résiduelle en fonction de la déformation résiduelle (fibres 1,5/1,7 %)

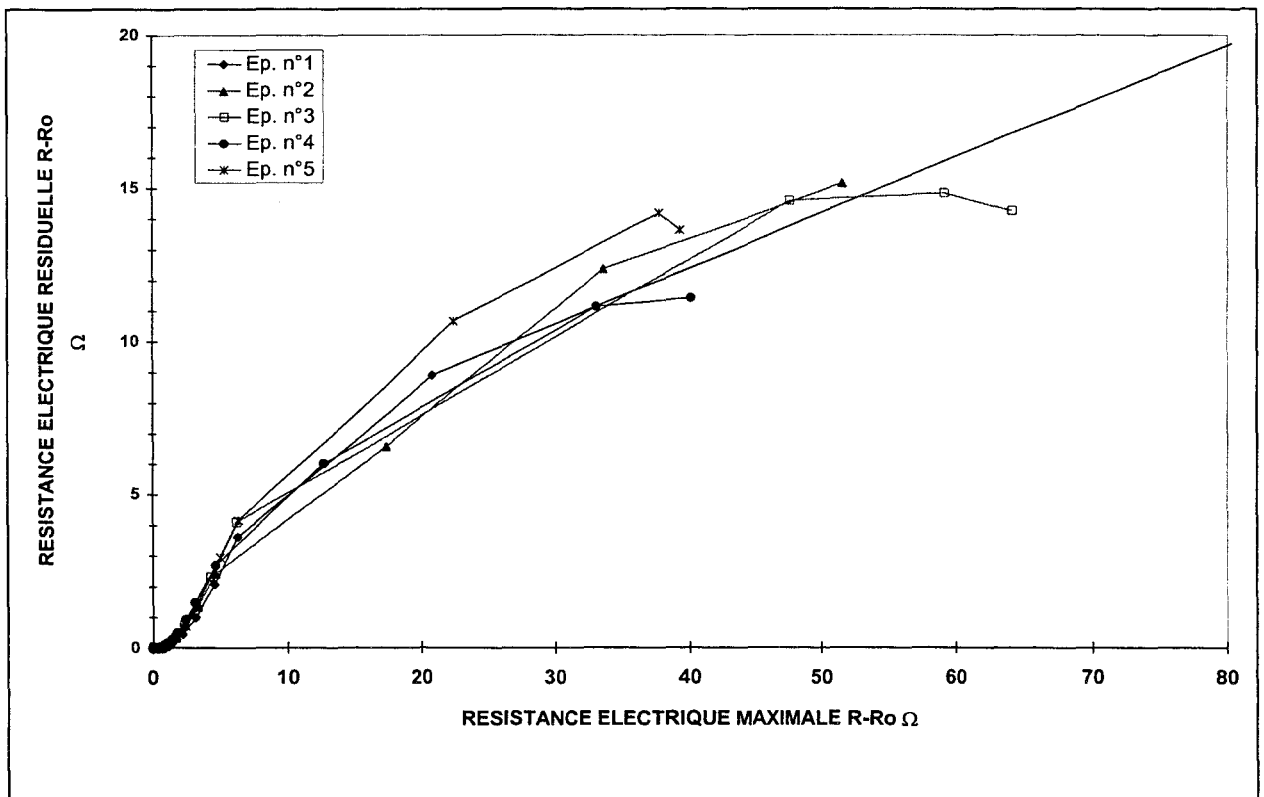
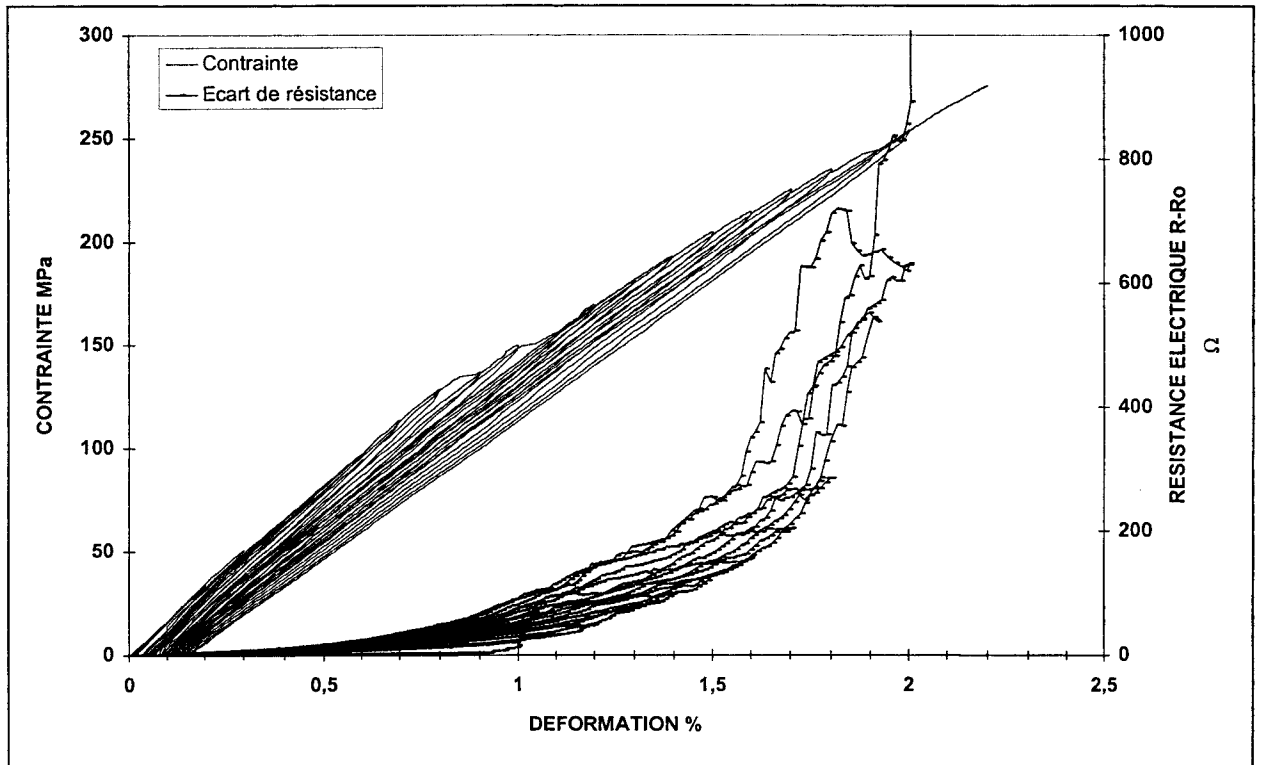


Fig. 3-47 : Résistance électrique résiduelle en fonction de la résistance électrique maximale (fibres 1,5/1,7 %)

La courbe de la résistance électrique résiduelle en fonction de la résistance électrique maximale montre également que la résistance électrique résiduelle n'augmente pas de façon linéaire avec la résistance électrique maximale. La résistance résiduelle augmente moins vite pour les fortes résistances électriques maximales et a tendance à se stabiliser pour une valeur palier. Cela peut s'expliquer par le processus de remise en contact des fibres de carbone (cf. § 3-2-2-1-3).

### 3.2.2.1.1.2. Fibres de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 %



**Fig.3-48 : Chargement répété progressif (fibres 0,6 %)**

Pour les fibres d'allongement à la rupture 0,6 %, l'augmentation de la résistance électrique maximale est plus importante que précédemment, mais sa diminution lors de l'annulation progressive de la contrainte est aussi beaucoup plus forte (cf. fig. 3-48 et 3-49). La courbe de la résistance électrique résiduelle moyenne en fonction de la déformation maximale (fig. 3-50) permet de mettre en évidence une première résistance électrique résiduelle non nulle pour une déformation maximale de 0,8 %, puis une augmentation linéaire en deux temps avec changement de pente vers 1,2 % de déformation. La pente plus faible de la fin de la courbe peut s'expliquer par le phénomène de remise en contact qui entraîne des diminutions de résistance électrique plus importantes pour les fortes résistances électriques maximales.

Des résultats et tendances analogues à ceux précédemment présentés fig. 3-44 à 3-47 pour les mèches de carbone 1,5/1,7 % sont également obtenus ici pour les fibres d'allongement à la rupture 0,6 %, conduisant à des conclusions similaires.

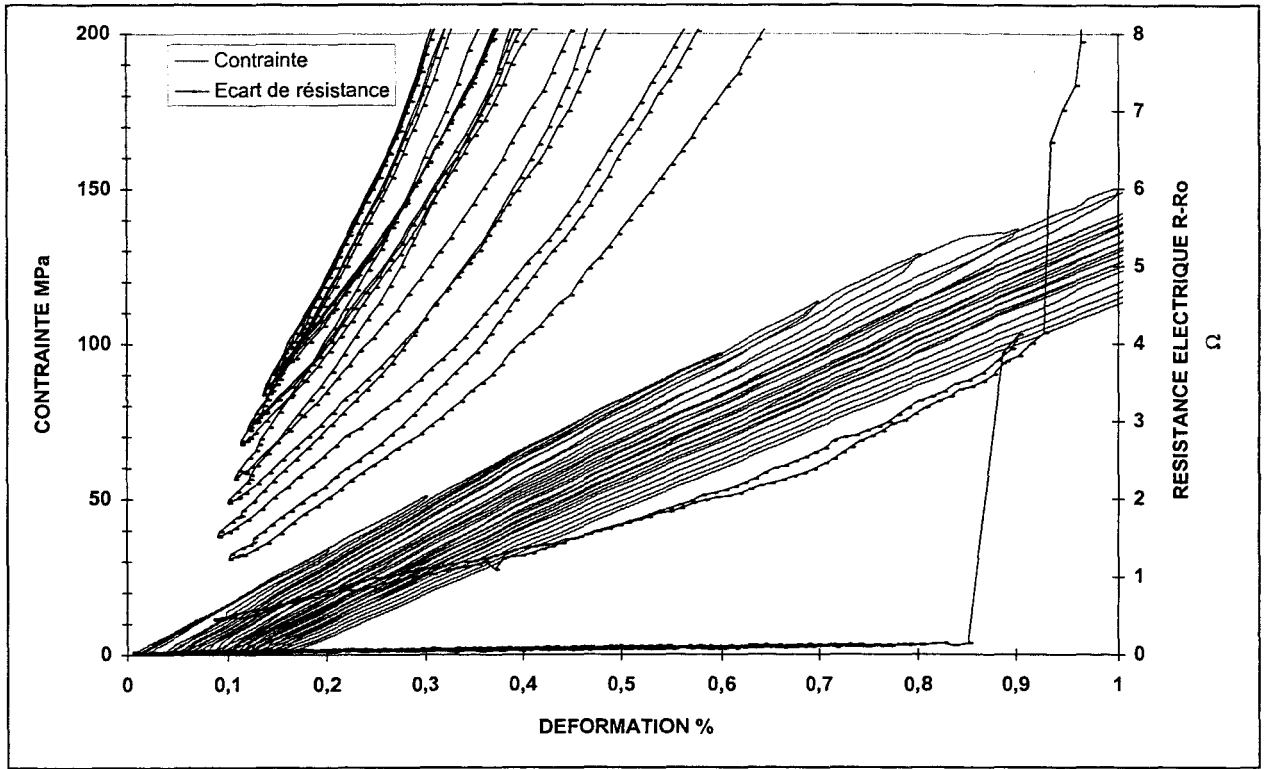


Fig. 3-49 : Chargement répété progressif (zoom)

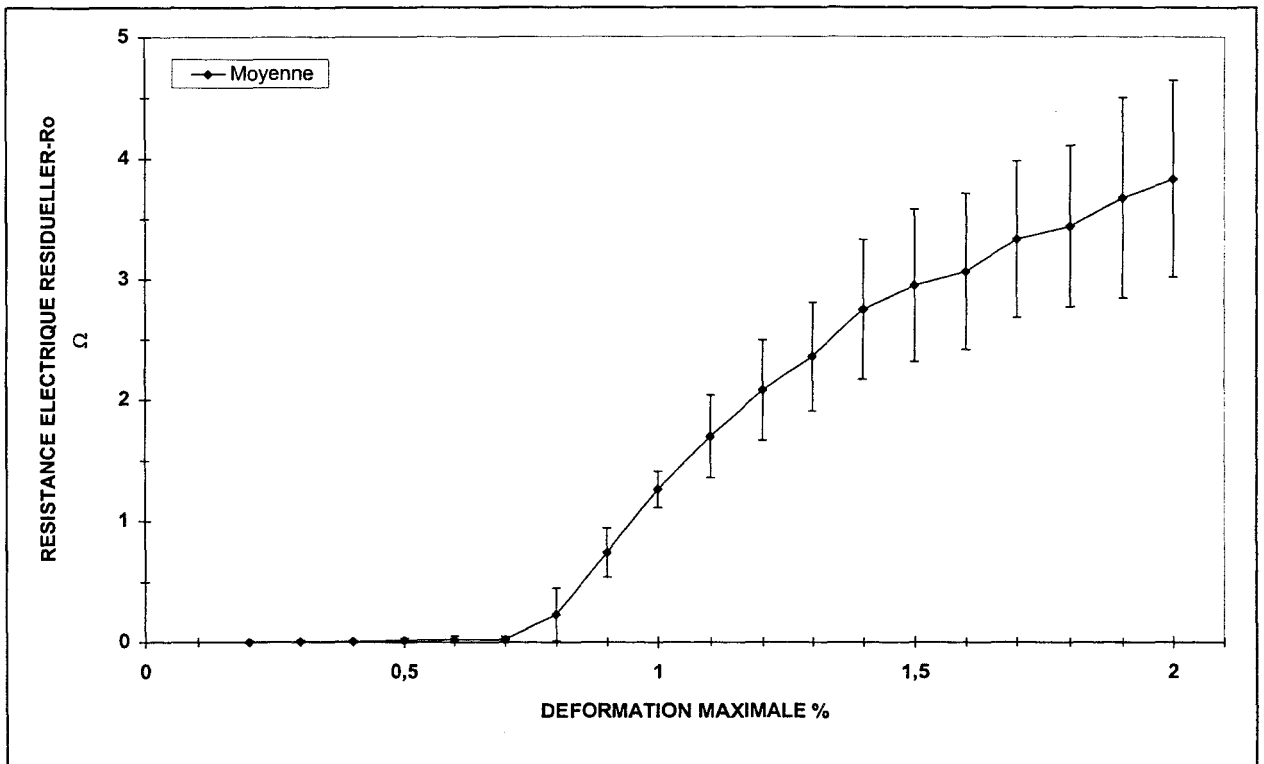
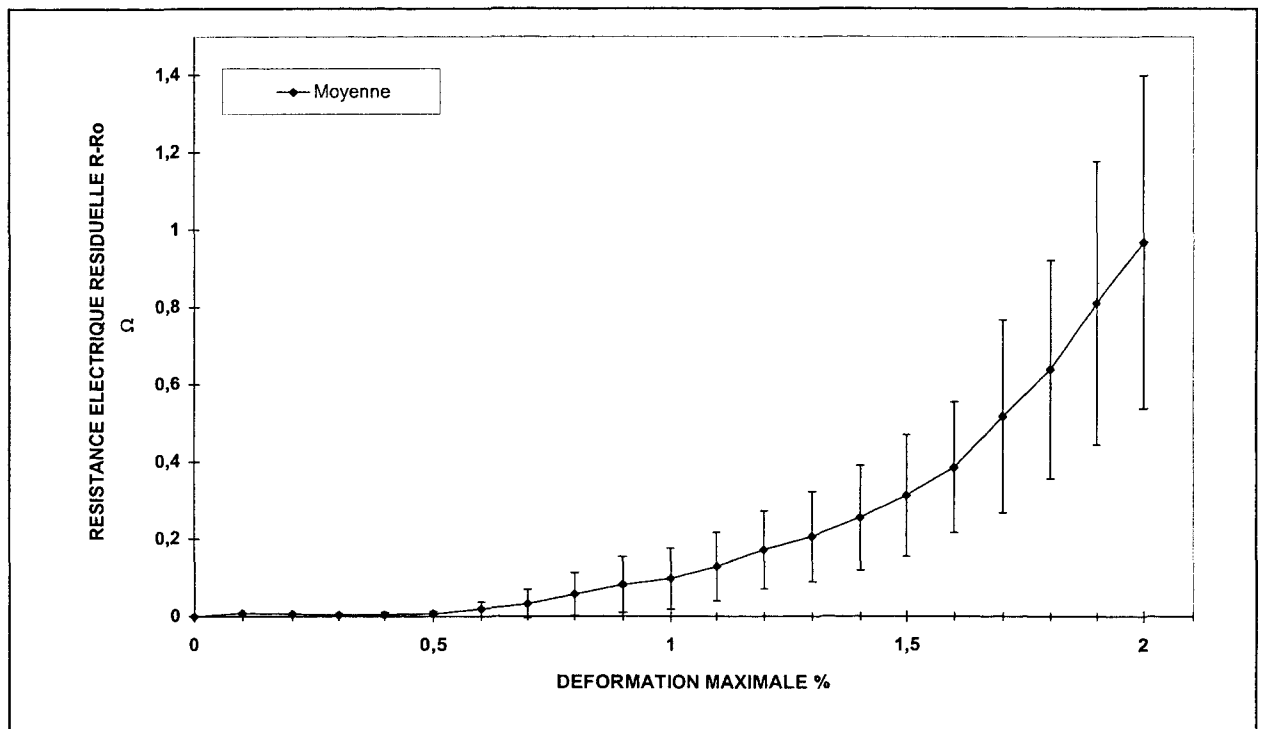


Fig. 3-50 : Résistance électrique résiduelle moyenne en fonction de la déformation maximale (fibres 0,6 %)

## 3.2.2.1.1.3. Fibres de carbone d'allongement à la rupture de 0,36 %

Pour les fibres 0,36 %, les valeurs de résistance électrique résiduelle sont très faibles bien que les résistances électriques maximales soient importantes. Il semble donc y avoir une remise en contact très importante des fibres de carbone entre elles.

La courbe de la résistance électrique résiduelle moyenne en fonction de la déformation maximale (cf. fig. 3-51) permet de mettre en évidence une première résistance électrique résiduelle non nulle pour une déformation maximale de 0,6 %. L'augmentation de la résistance électrique résiduelle est beaucoup plus progressive que pour les deux autres mèches de carbone.



**Fig. 3-51 : Résistance électrique résiduelle moyenne fonction de la déformation maximale (fibres 0,36 %)**

3.2.2.1.2. Analyse comparée pour les différentes mèches de carbone

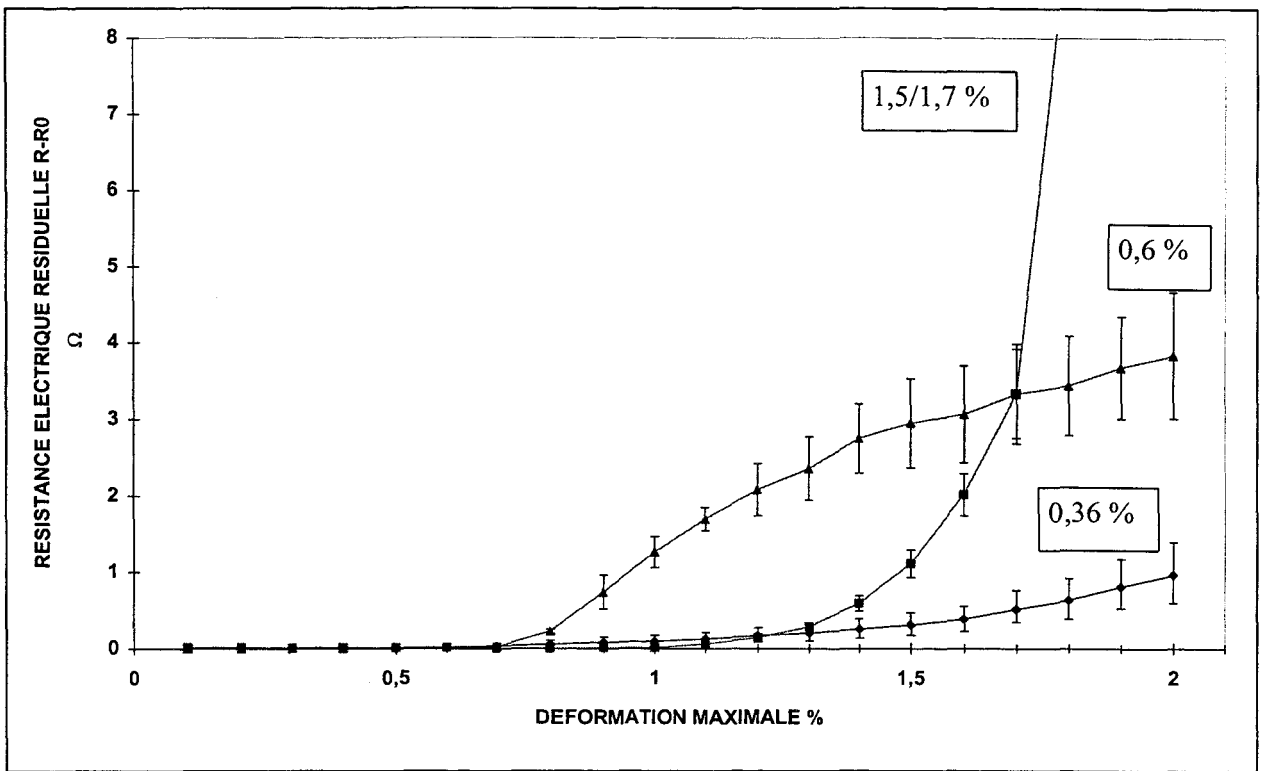


Fig. 3-52 : Résistance électrique résiduelle pour les différentes mèches de carbone

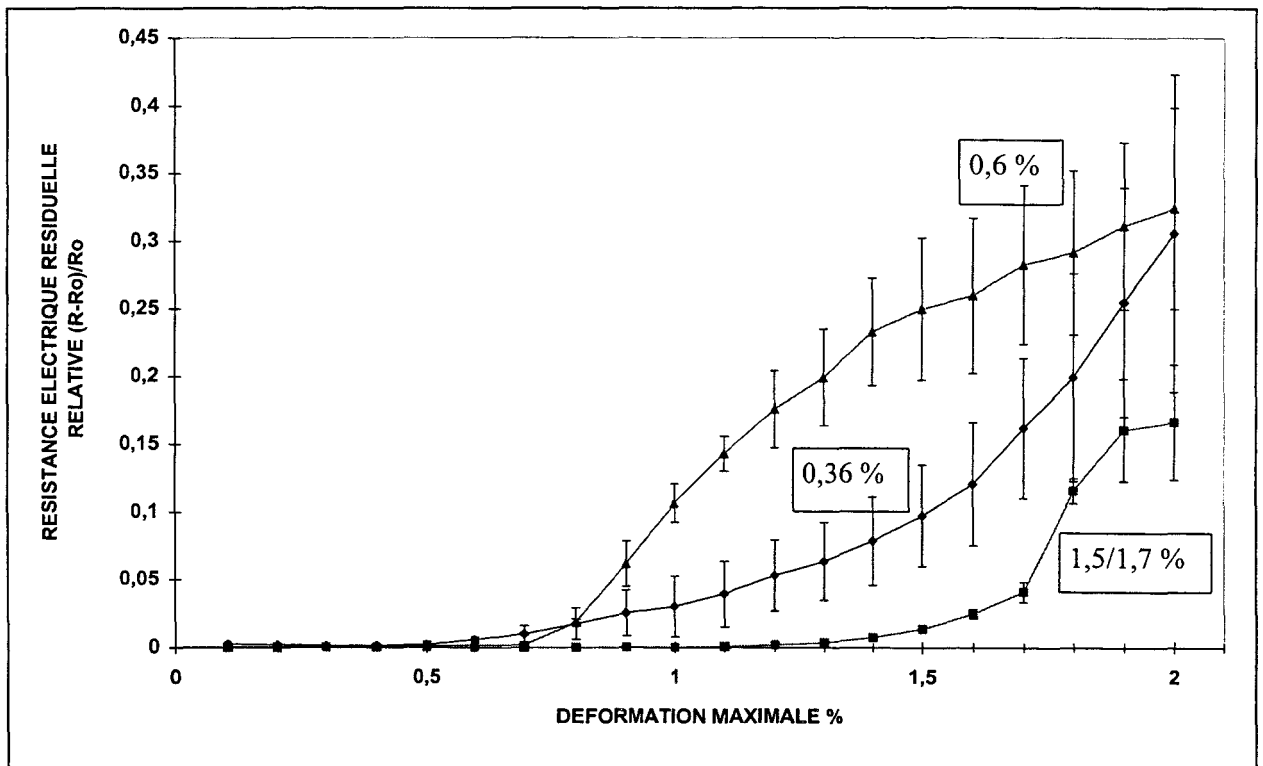


Fig. 3-53 : Résistance électrique résiduelle relative pour les différentes mèches de carbone

La comparaison des trois courbes de résistance électrique résiduelle en fonction de la déformation maximale (cf. fig. 3-52) montre que la résistance électrique résiduelle est la plus élevée pour la mèche d'allongement à la rupture 0,6 %, entre 0,8 % et 1,7 % de déformation. Au-delà, la résistance électrique résiduelle de la fibre 1,5/1,7 % devient la plus importante. Cela s'explique par le niveau de rupture différent pour ces deux mèches (première augmentation de résistance électrique due à la rupture des fibres à 0,8 % de déformation pour les mèches d'allongement à la rupture 0,6 % et 1,1 % pour les mèches d'allongement à la rupture 1,5/1,7 %). En revanche, l'amplitude de la résistance électrique résiduelle de la mèche d'allongement à la rupture 0,36 % est largement la plus faible alors qu'il s'agit de la mèche de carbone cassant pour la plus faible déformation (0,45 %).

Si l'on considère les résistances électriques relatives (cf. fig. 3-53), la résistance électrique résiduelle de la mèche de carbone d'allongement à la rupture 1,5/1,7 % est beaucoup plus faible que celle des deux autres mèches en raison de sa résistance électrique initiale qui est d'un ordre de grandeur dix fois supérieur (cf. § 3-1-3-1-2).

En fait, la résistance électrique résiduelle dépend de plusieurs paramètres, d'une part de la résistance électrique maximale atteinte au cycle précédent, dont la valeur est fonction de l'allongement à la rupture de la mèche de carbone ainsi que de son spectre de distribution en rupture, et d'autre part du taux de remise en contact des fibres de carbone entre elles. Ce dernier diffère d'une mèche de carbone à l'autre et il semblerait plus important pour les mèches d'allongement à la rupture 0,36 % que pour les deux autres types de mèches de carbone.

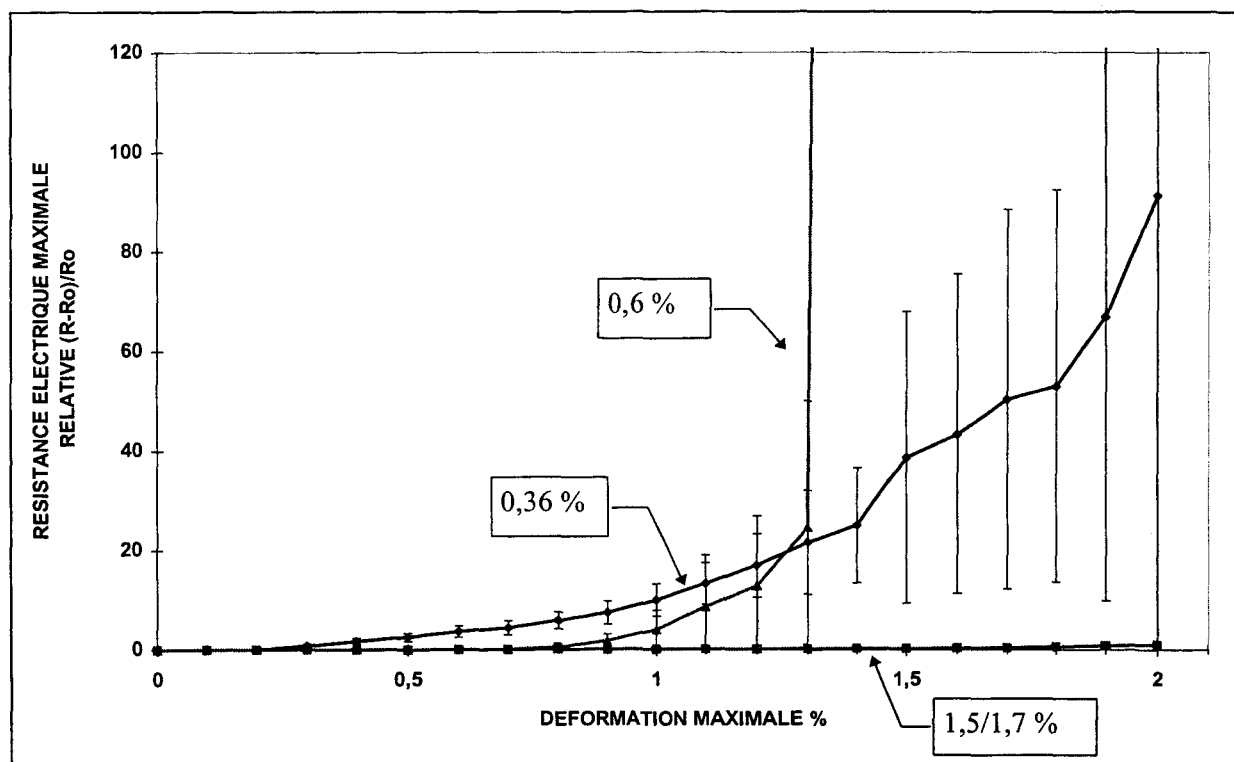


Fig. 3-54 : Résistance électrique maximale relative pour les différentes mèches de carbone



La résistance électrique maximale relative la plus importante en fonction de la déformation maximale (cf. fig. 3-54) est obtenue après 0,9 % de déformation par les mèches d'allongement à la rupture 0,6 %, bien qu'a priori on puisse s'attendre à ce que les mèches d'élongation à la rupture la plus faible aient aussi la résistance électrique relative maximale la plus forte. Cette inversion hiérarchique peut être attribuée à une distribution d'allongements à la rupture plus étroite pour les fibres 0,6 % que pour les fibres 0,36 % ou encore à des effets de conduction transverse (cf. § 4-3-2-2). En comparant les courbes des résistances électriques relatives résiduelles et maximales, on constate une certaine corrélation entre ces deux grandeurs, ainsi après 1,3 % de déformation, c'est bien la mèche possédant la résistance électrique relative maximale la plus élevée (mèche 0,6 %) qui a aussi la résistance électrique résiduelle relative la plus importante. Les mèches d'allongement à la rupture 1,5/1,7 % possèdent quant à elles les résistances maximales et résiduelles relatives les plus faibles. Cependant alors que leur résistance maximale relative est négligeable par rapport à celle des deux autres mèches de carbone, leur résistance électrique résiduelle relative est du même ordre de grandeur pour les fortes déformations.

En considérant les courbes de la figure 3-55, il apparaît que pour une résistance électrique maximale donnée, la résistance électrique résiduelle correspondant pour les mèches 1,5/1,7 % est beaucoup plus importante que pour les deux autres types de mèches de carbone. Le taux de remise en contact des fibres précédemment rompues entre elles paraît donc différent pour chaque type de mèches de carbone. Par ailleurs, la déformation résiduelle est sensiblement équivalente pour les éprouvettes instrumentées avec les trois types de fibres (cf. fig. 3-56), on peut donc conclure que la nature de la fibre influence directement sur le taux de remise en contact des fibres cassées.

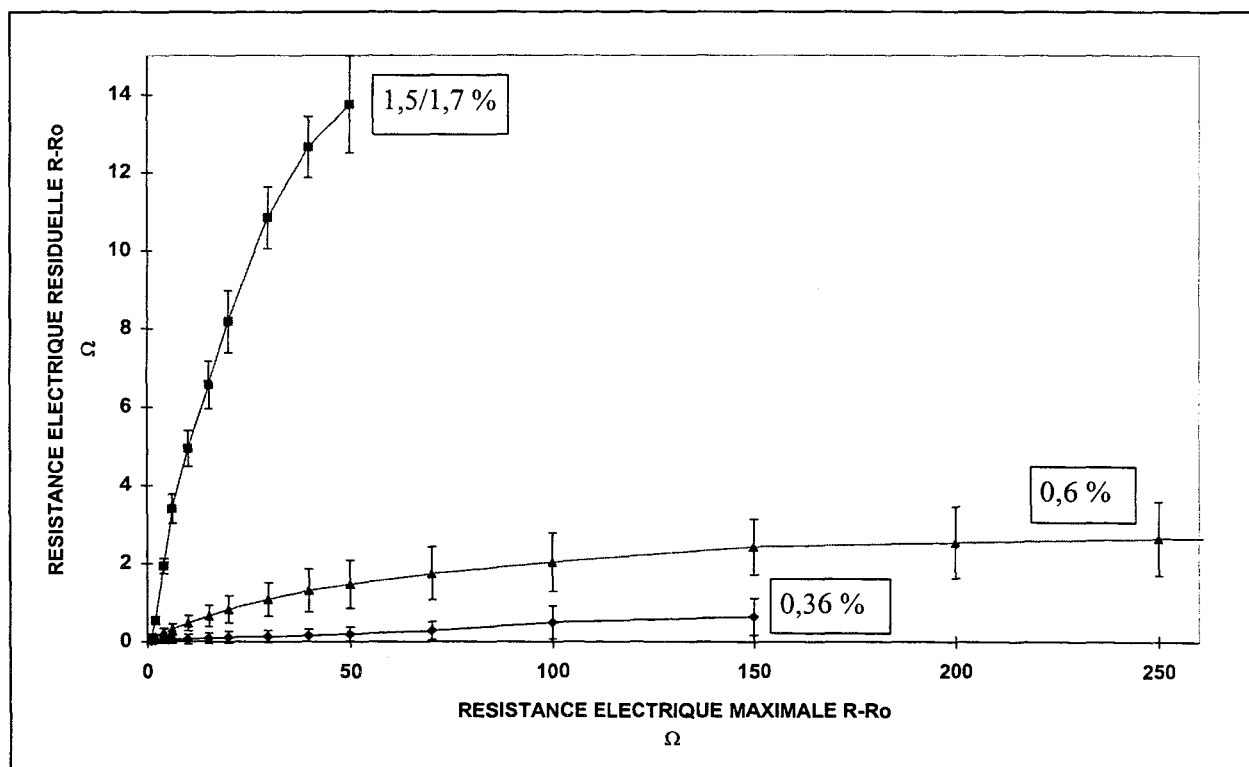


Fig. 3-55 : Courbes de la résistance électrique résiduelle en fonction de la résistance électrique maximale pour les différentes mèches de carbone

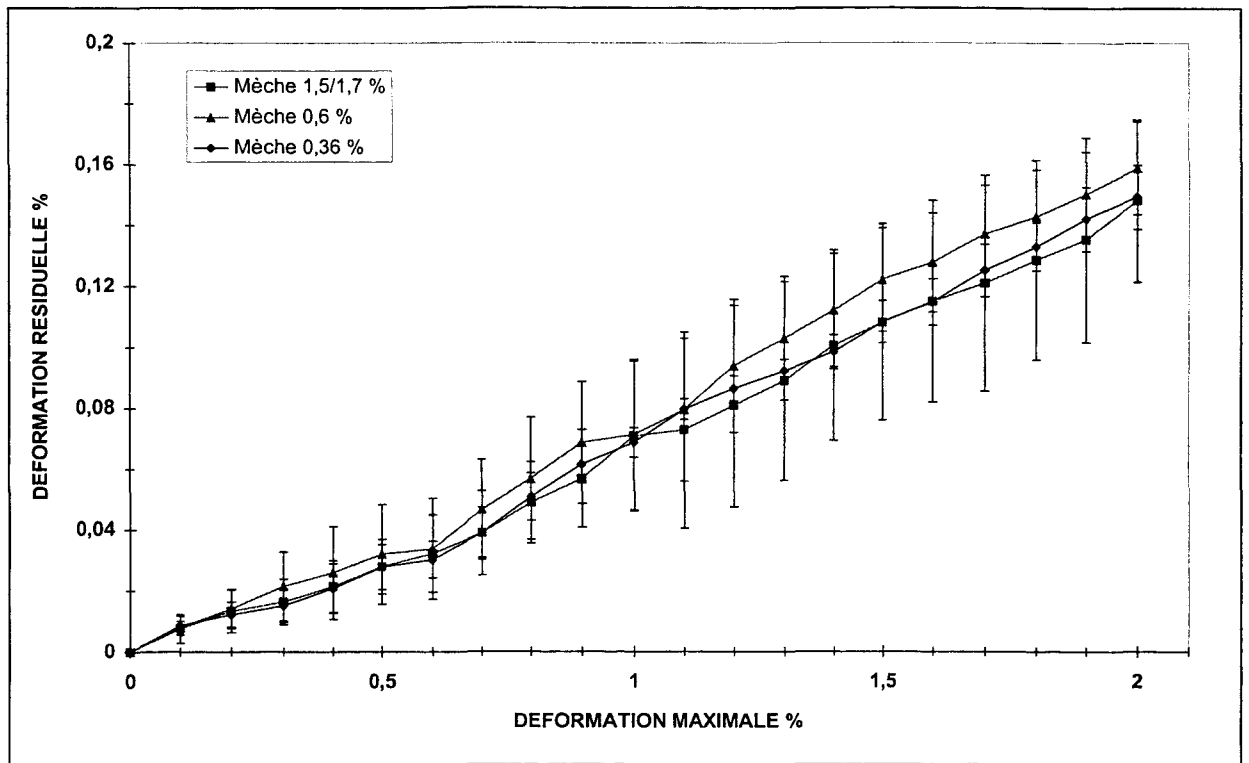


Fig. 3-56 : Déformation résiduelle pour les différents types de fibres de carbone

### 3.2.2.1.3. Détermination du taux de remise en contact des fibres de carbone rompues

Un calcul simple du taux de remise en contact des fibres de carbone entre elles peut être effectué, en considérant les mèches de carbone comme un arrangement en parallèle de toutes les fibres de carbone (cf. § 3-1-3-2) et en exprimant la résistance électrique résiduelle comme suit :

$$\Delta R_{re} = R_0 \frac{n - n_{ct}}{N - (n - n_{ct})} \quad (3-14)$$

avec :

- $\Delta R_{re}$  : résistance électrique résiduelle
- $n$  : nombre de fibres de carbone coupées
- $N$  : nombre de fibres de carbone total de la mèche
- $n_{ct}$  : nombre de fibres de carbone coupées remises en contact
- $R_0$  : résistance électrique initiale de la mèche de carbone

Si l'on considère  $n_{ct}$  comme un pourcentage  $p$  du nombre total de fibres rompues :

$$n_{ct} = p n$$

Quand  $n$  tend vers  $N$ , la résistance électrique résiduelle tend alors vers une valeur palier :

$$\Delta R_{\text{re palier}} = R_0 \frac{1-p}{p} \quad (3-15)$$

A partir de l'équation (3-14), il est possible d'obtenir les courbes théoriques de la résistance électrique résiduelle en fonction de la résistance électrique maximale obtenue au cours du cycle, en considérant le nombre de fibres remises en contact comme un pourcentage constant du nombre de fibres rompues. Les figures 3-57, 3-58 et 3-59 présentent les résultats obtenus pour les différents types de mèches de carbone auxquels sont superposées les courbes expérimentales moyennes. Les courbes expérimentales ont globalement la même allure que les courbes théoriques avec une résistance électrique résiduelle qui tend vers un palier pour les fortes résistances électriques maximales. On obtient ainsi une approximation du taux de remise en contact des fibres de carbone entre elles, compris entre 50 % et 60 % pour les fibres d'allongement à la rupture 1,5/1,7 %, entre 80 % et 90 % pour les fibres 0,6 % et entre 92 % à 97 % pour les fibres 0,36 %. Il convient aussi de remarquer, en observant les courbes expérimentales, que le taux de remise des fibres de carbone entre elles est plus élevé pour les faibles résistances électriques maximales car la déformation résiduelle de l'éprouvette est plus faible en début d'essai.

On peut faire l'hypothèse que la différence des taux de remise en contact pour chaque type de mèches provient de la nature différente de leur faciès de rupture : un état de surface de rupture lisse assurant un meilleur contact électrique après suppression de la contrainte qu'un état de surface de rupture accidenté.

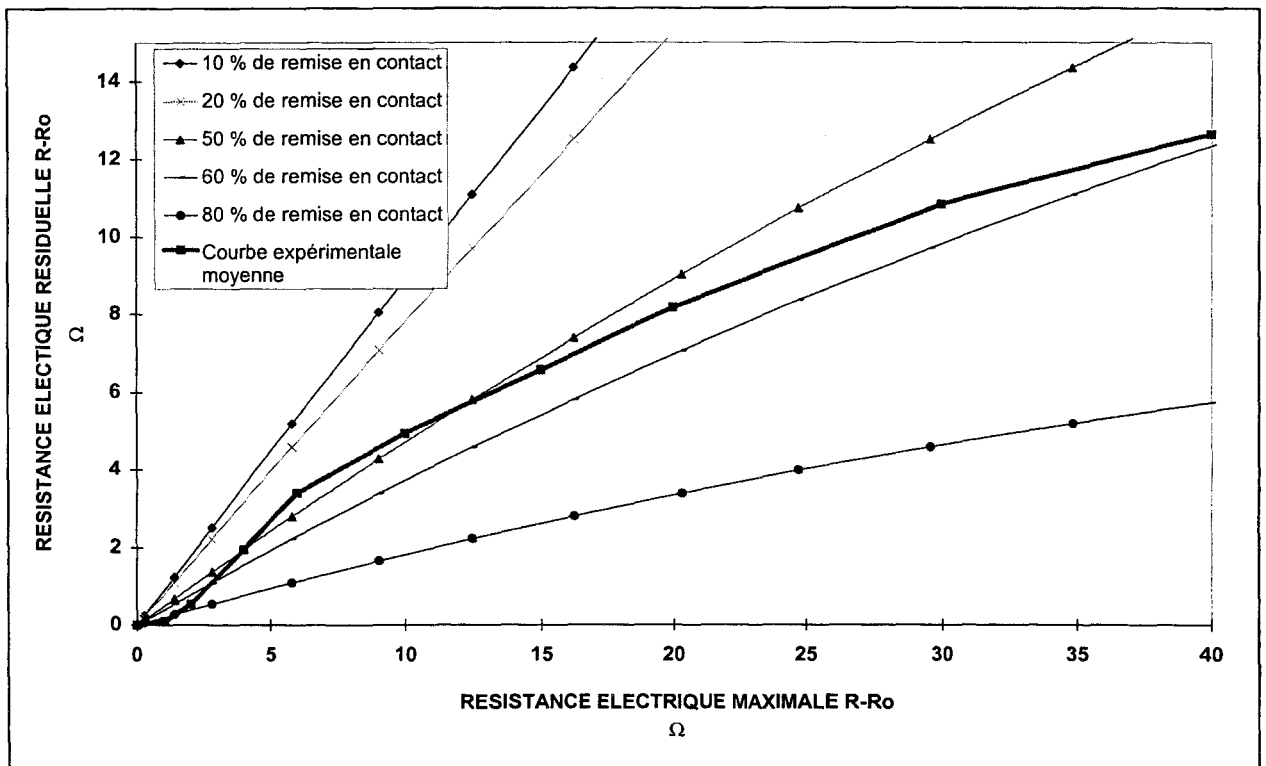


Fig. 3-57 : Courbes théoriques de la résistance électrique résiduelle en fonction de la résistance maximale pour les fibres 1,5/1,7 %

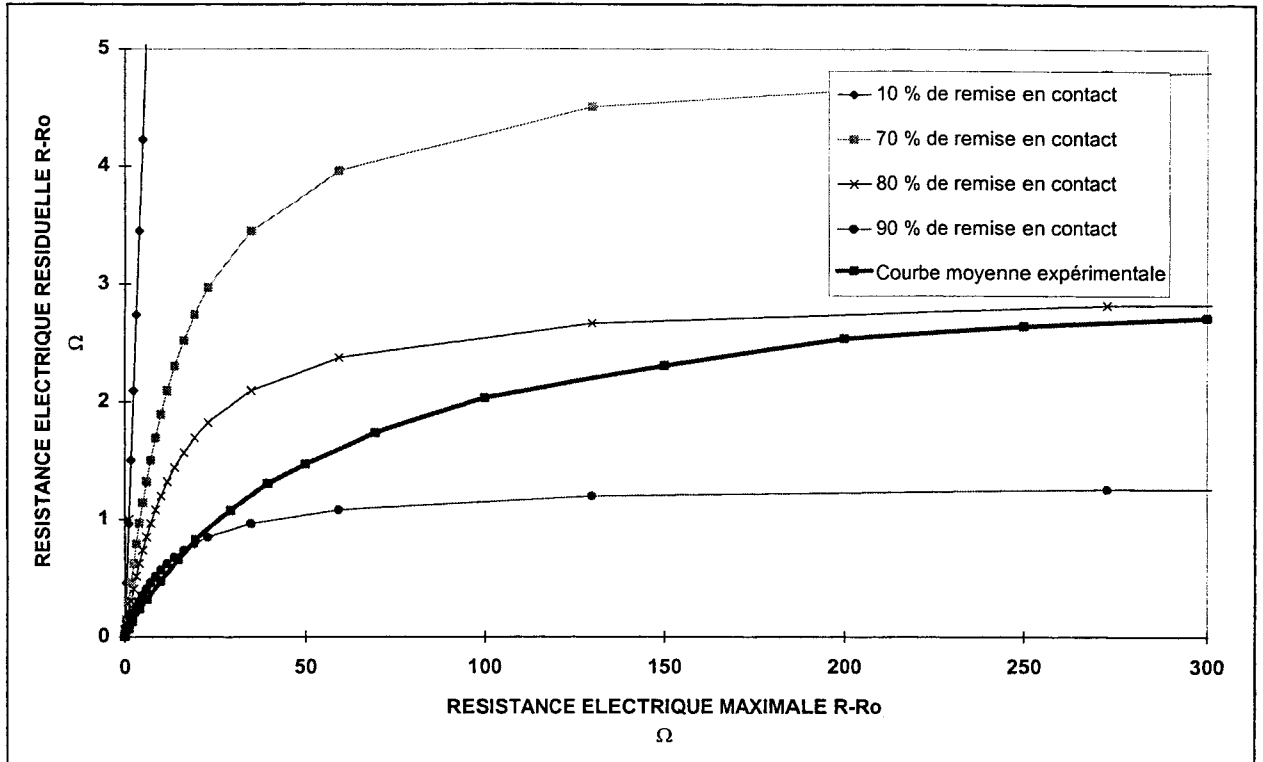


Fig. 3-58 : Courbes théoriques de la résistance électrique résiduelle en fonction de la résistance maximale pour les fibres 0,6 %

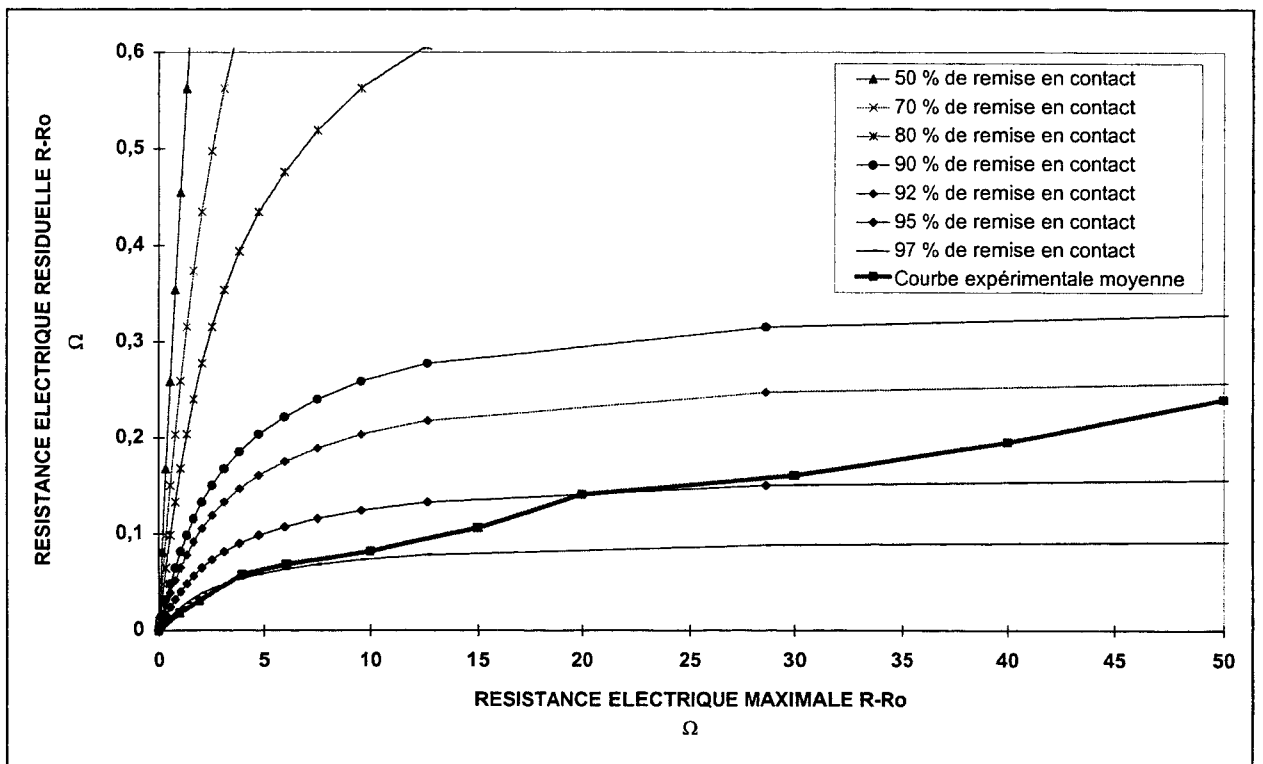


Fig. 3-59 : Courbes théoriques de la résistance électrique résiduelle en fonction de la résistance maximale pour les fibres 0,36 %

La résistance électrique résiduelle dépend donc non seulement de la résistance électrique maximale atteinte, mais aussi de la remise en contact des fibres qui constitue un facteur essentiel, puisque qu'il y a pour les mèches de carbone plus de 50 % et jusqu'à 95 % des fibres de carbone qui reviennent en contact entre elles. Une part très importante de la résistance électrique maximale atteinte s'annule donc lors du déchargement de l'éprouvette. Pour achever l'étude de la résistance électrique résiduelle, il convient de regarder si cette dernière reste constante au cours du temps après suppression de la contrainte.

#### 3.2.2.1.4. Influence du temps après déchargement sur la résistance électrique résiduelle

Pour mettre en évidence l'influence du facteur temps, et ce pour les différents types de mèches de carbone, des éprouvettes sont sollicitées jusqu'à un certain niveau de déformation, puis la contrainte est relâchée brutalement. La résistance électrique résiduelle de l'éprouvette est alors relevée en fonction du temps (cf. fig. 3-60, 3-61, 3-62). Les différents graphiques montrent que la résistance électrique résiduelle ne se stabilise pas immédiatement après la chute de la contrainte, mais présente une chute amortie dans le temps. La stabilisation complète de la résistance électrique intervient pour un temps de l'ordre de 100 min. pour les mèches d'allongement à la rupture de 1,5/1,7 % et pour un temps de l'ordre de 1000 min. (17 h.) pour les mèches de 0,6 % et 0,36 % d'allongement à la rupture. L'influence du facteur temps sur la résistance électrique résiduelle peut être expliquée par le caractère viscoélastique des éprouvettes utilisées, des phénomènes de recouvrance viscoélastique entraînant une baisse progressive et amortie de la déformation résiduelle de l'éprouvette après suppression de la contrainte.

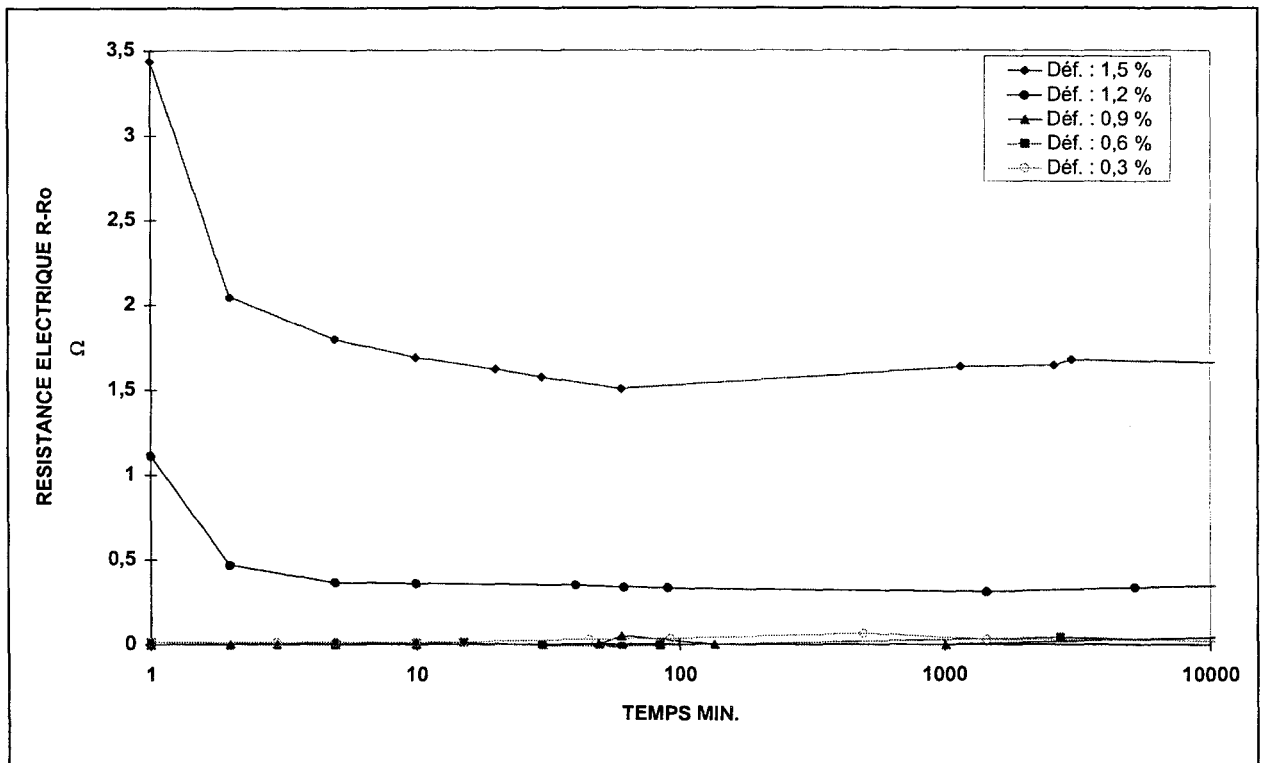


Fig. 3-60 : Variation de la résistance électrique résiduelle en fonction du temps après suppression de la contrainte (mèche d'allongement à la rupture 1,5/1,7 %)

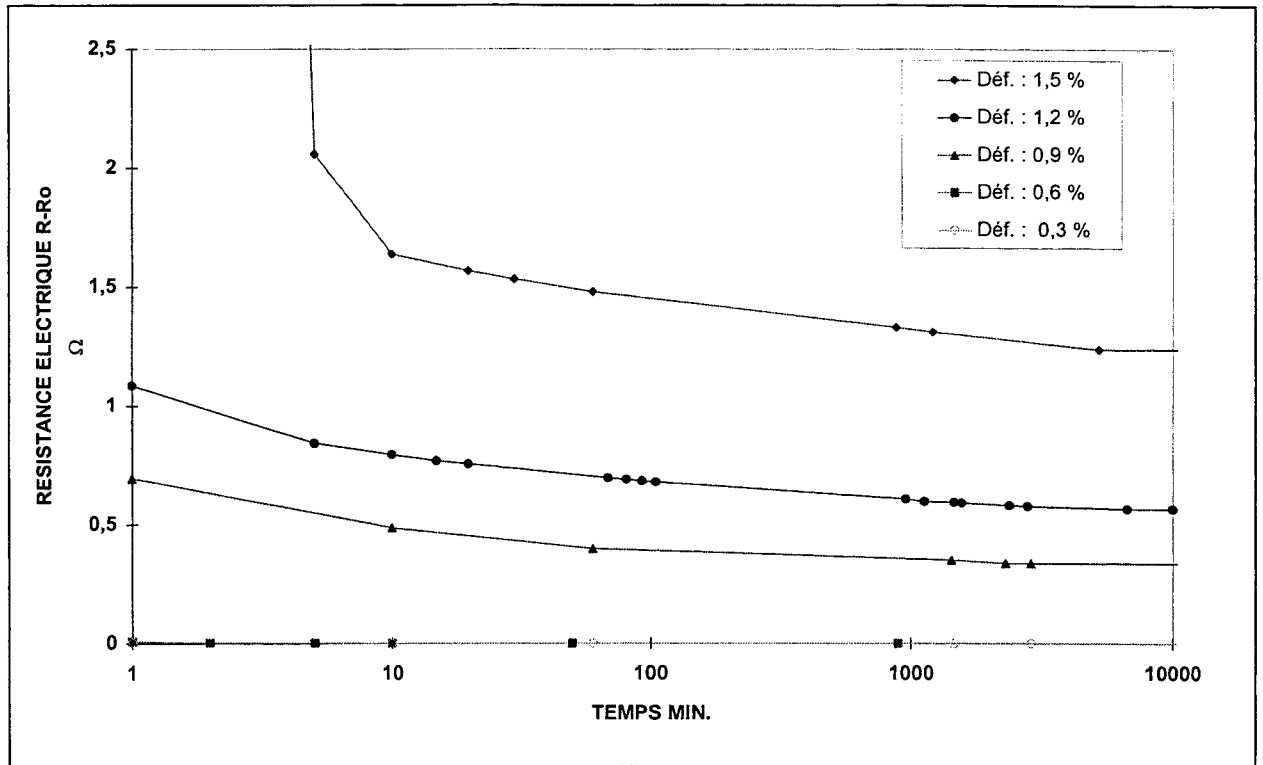


Fig. 3-61 : Variation de la résistance électrique résiduelle en fonction du temps après suppression de la contrainte (mèche d'allongement à la rupture de 0,6 %)

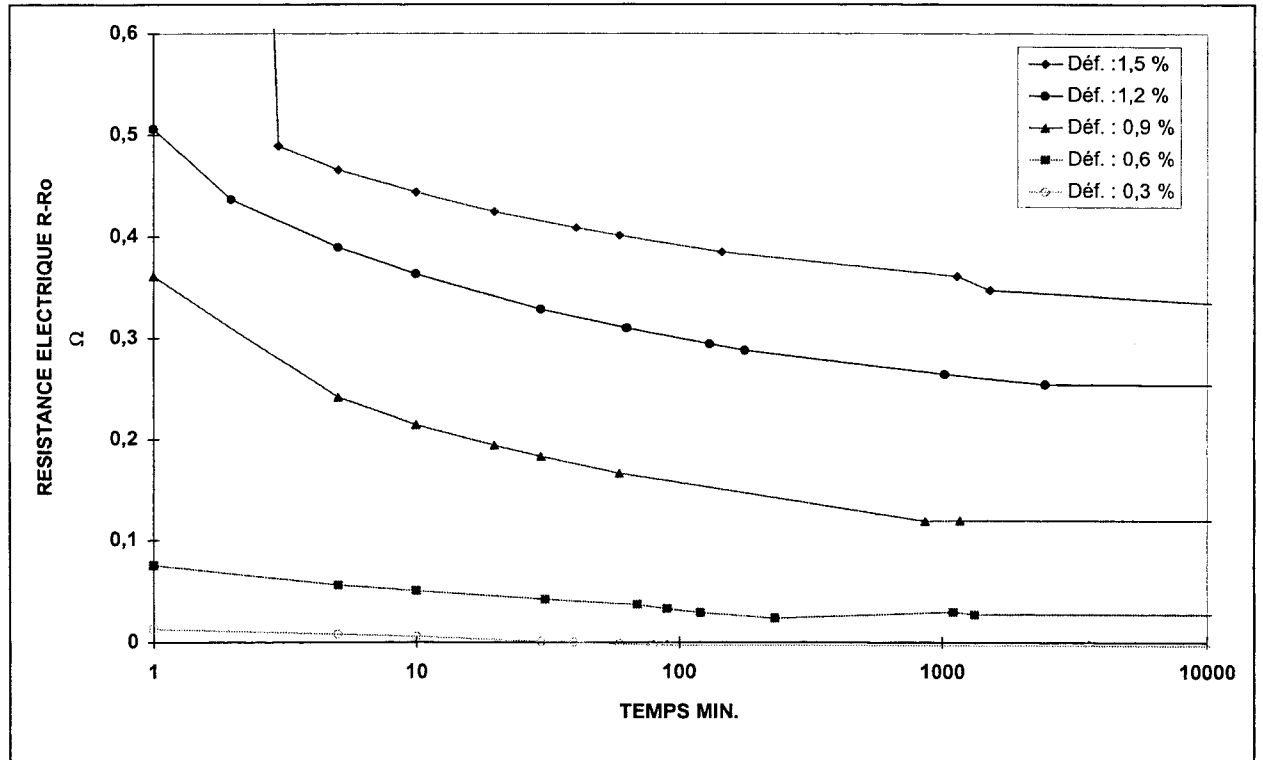
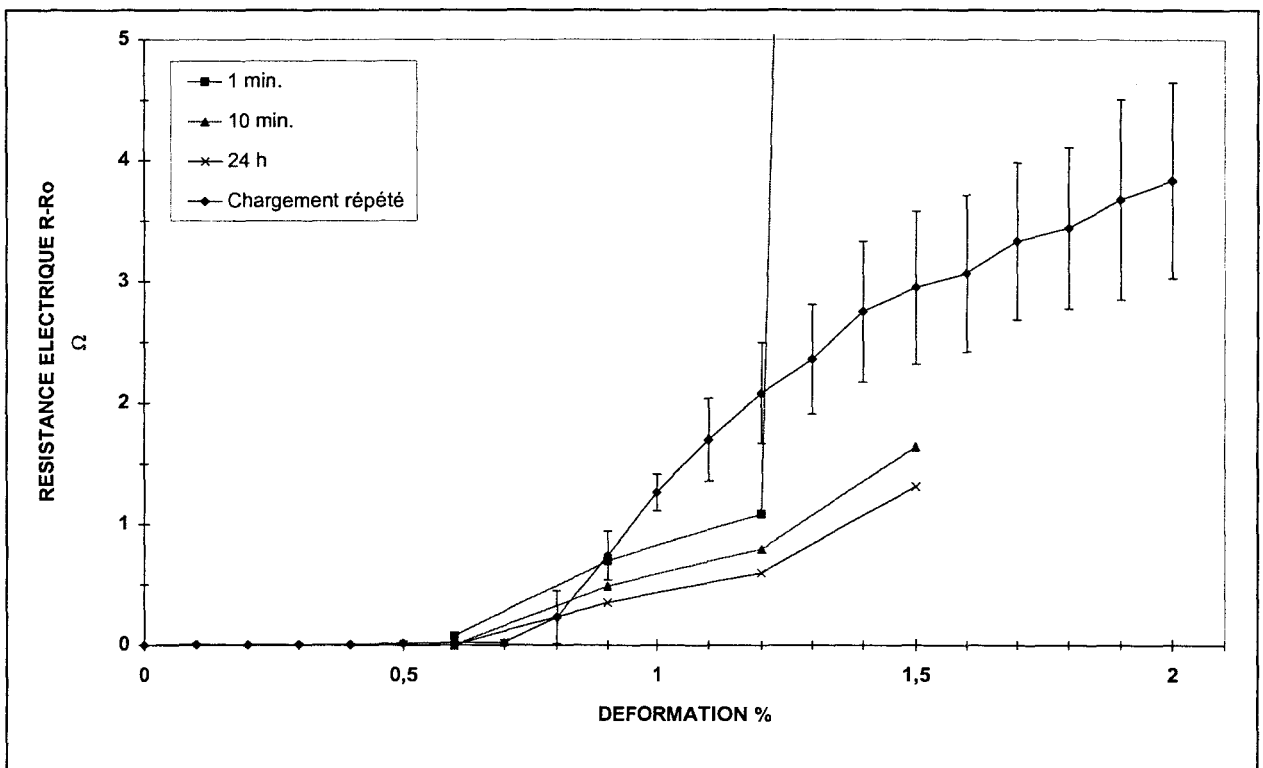


Fig. 3-62 : Variation de la résistance électrique résiduelle en fonction du temps après suppression de la contrainte (mèche d'allongement à la rupture de 0,36 %)

### 3.2.2.1.5. Intérêt de la résistance électrique résiduelle pour le capteur d'endommagement

Grâce à sa résistance électrique résiduelle, le capteur développé est capable d'obtenir une information sur l'état d'endommagement du matériau même après disparition de la contrainte ayant engendré l'endommagement. Cette résistance électrique résiduelle, qui traduit le caractère partiellement irréversible du capteur utilisé, permet donc au capteur de mémoriser l'endommagement subi par le matériau. D'un point de vue pratique cette mémoire du capteur est intéressante dans la mesure où elle autorise un suivi de l'endommagement effectué de manière périodique et non pas obligatoirement en continu.



**Fig. 3-63 : Comparaison entre les résultats d'un essai de traction en chargement répété progressif et les valeurs de résistance électrique résiduelle obtenues 1 min., 10 min. et 24 h après suppression de la contrainte (fibre 0,6 %)**

Cependant, compte-tenu de la dépendance assez forte de la résistance électrique résiduelle avec le temps après suppression de la contrainte, il semble assez difficile de corrélérer avec précision la résistance électrique résiduelle avec la déformation maximale précédemment subie par le matériau. En effet la résistance électrique résiduelle tend à baisser avec la durée depuis laquelle la contrainte a été supprimée. La figure 3-63 illustre ce point en présentant l'écart de résistance électrique résiduelle obtenu durant un essai de chargement répété progressif (déchargement progressif de la contrainte à la vitesse de 1 mm/min.) et la résistance électrique résiduelle obtenue lors d'essais de traction simple, 1 minute, 10 minutes et 24

heures après la suppression de la contrainte (après 24 heures la résistance électrique résiduelle est stabilisée).

Des écarts importants entre les différentes courbes sont visibles, mais dès les premières valeurs de résistance électrique résiduelle non nulles obtenues en chargement répété progressif, l'effet du facteur temps est loin d'annuler complètement la résistance électrique résiduelle. Aussi, la présence d'une résistance électrique résiduelle permet au moins de savoir qu'une déformation maximale supérieure à un certain seuil (qui est de 1,2 % pour les mèches d'allongement à la rupture 1,5/1,7 %, 0,8 % pour les mèches d'allongement à la rupture 0,6 % et 0,6 % pour les mèches d'allongement à la rupture 0,36 %) a été atteinte ou dépassée.

Il reste maintenant à juger de l'effet du temps sur la réponse électrique du capteur sous sollicitation répétée à amplitude constante de déformation ou d'effort. C'est l'objet du paragraphe suivant sur le chargement en fatigue.



### 3.2.2.2. Chargement répété d'amplitude constante (fatigue)

A coté des essais de chargements répétés à amplitude croissante, sont également réalisés des essais de fatigue dynamique à amplitude de flèche ou de contrainte constante afin d'analyser la réponse des capteurs résistifs développés pour des champs de sollicitation proches de cas réels. Lors de tels essais de fatigue, l'endommagement correspondant à la chute de la rigidité de l'éprouvette peut être facilement mis en évidence : cette chute est proportionnelle à la diminution de la contrainte maximale pour les essais de fatigue à amplitude de flèche imposée et inversement proportionnelle à l'augmentation de la déformation maximale pour des essais à amplitude de contrainte imposée.

#### 3.2.2.2.1. Fatigue à amplitude de flèche imposée (flexion en appuis trois points)

Ces essais de fatigue sont effectués à fréquence de 1 Hz dans les conditions expérimentales rappelées dans le paragraphe (§ 2-2-6-1). Différents niveaux de chargement sont utilisés, l'un supérieur et l'autre inférieur au premier seuil d'endommagement instantané du composite verre/résine étudié ici, l'un induisant une réponse immédiate du capteur, l'autre engendrant une réponse différée.

##### 3.2.2.2.1.1. Essais à contrainte initiale prise à 75 % de la contrainte à la rupture de l'éprouvette en statique ( $\sigma_{r \text{ statique}}$ )

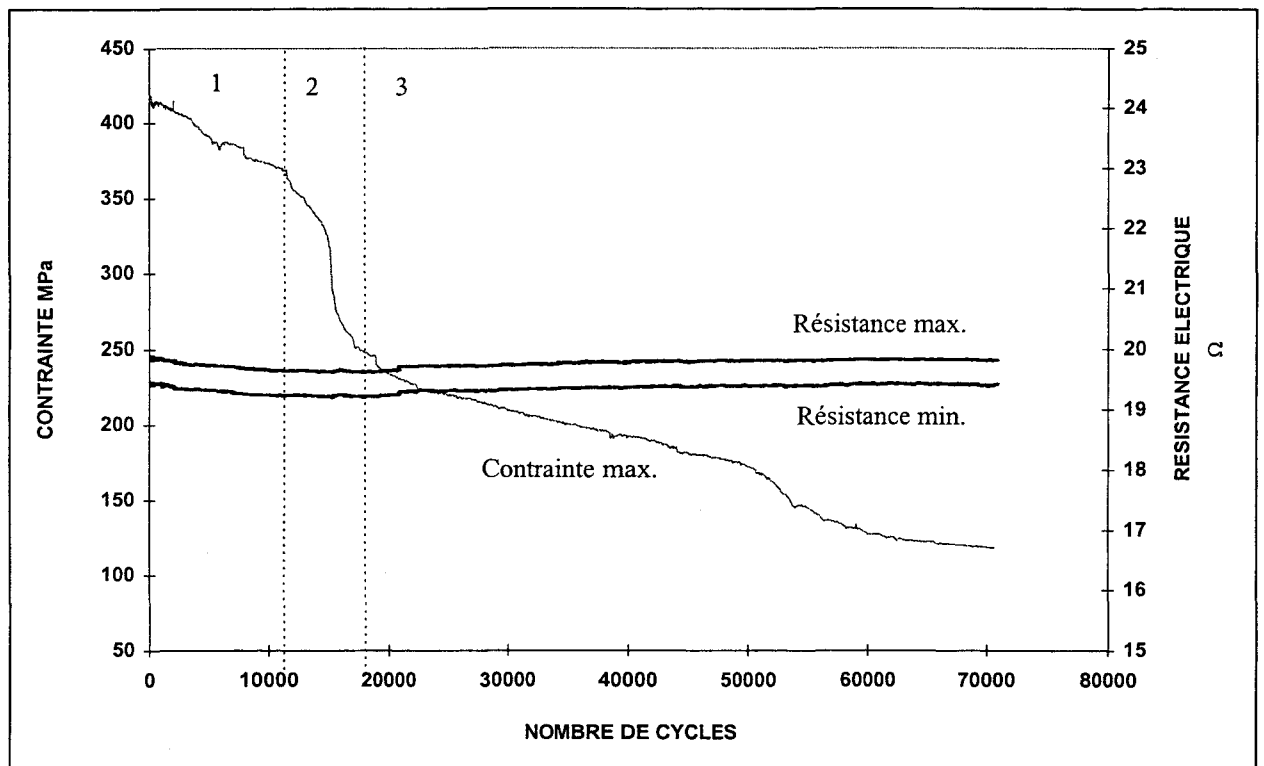
L'amplitude de flèche est fixée à 6 mm, ce qui correspond à une déformation subie par la mèche de carbone de 2,2 %. En se reportant aux lois de comportement en flexion trois points (cf. § 3-2-1-1), il apparaît que le niveau de sollicitation exercé sur l'éprouvette est supérieur à la fin du régime élastique du matériau. L'endommagement de l'éprouvette est donc effectif dès les premiers cycles de fatigue. Cette première étape est destinée à analyser l'évolution de la réponse du capteur avec l'augmentation du nombre des cycles de sollicitation subis par l'éprouvette, et notamment en terme de résistance électrique résiduelle.

Lors des essais, la contrainte maximale et les résistances électriques maximales et minimales sur un cycle sont enregistrées en fonction du nombre de cycles effectués. En effet, une fois les premières fibres de carbone rompues, la réponse électrique varie au cours d'un cycle (cf. fig. 3-67) du fait des contacts entre fibres de carbone qui interviennent durant ce cycle. Sous contrainte maximale, les fibres sont fléchies et s'écartent les unes des autres, tandis que sous contrainte minimale, les fibres entrent à nouveau en contact entre elles d'où une diminution de la résistance électrique. La résistance électrique maximale correspond donc à la réponse du capteur sous flèche maximale alors que la résistance électrique minimale correspond à la réponse du capteur lorsque la sollicitation exercée sur l'éprouvette s'annule en cours de cycle. Cette dernière s'apparente donc à la résistance électrique résiduelle.

La figure 3-64 présente les résultats obtenus pour une éprouvette instrumentée avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 2,1 %. La courbe de contrainte présente plusieurs discontinuités marquées, notamment pour une zone située entre 13 000 et 19 000 cycles, où la contrainte chute de façon très rapide jusqu'à 58 % de sa valeur initiale. L'observation de l'éprouvette après l'essai de fatigue indique que deux types

d'endommagement sont intervenus : des fissurations transverses et un délaminage entre le dernier et l'avant dernier pli. Seules les éprouvettes avec un délaminage important (de la panne centrale à l'un des appuis) présentent ce type de comportement avec une telle discontinuité de pente et une telle chute de contrainte en zone 2.

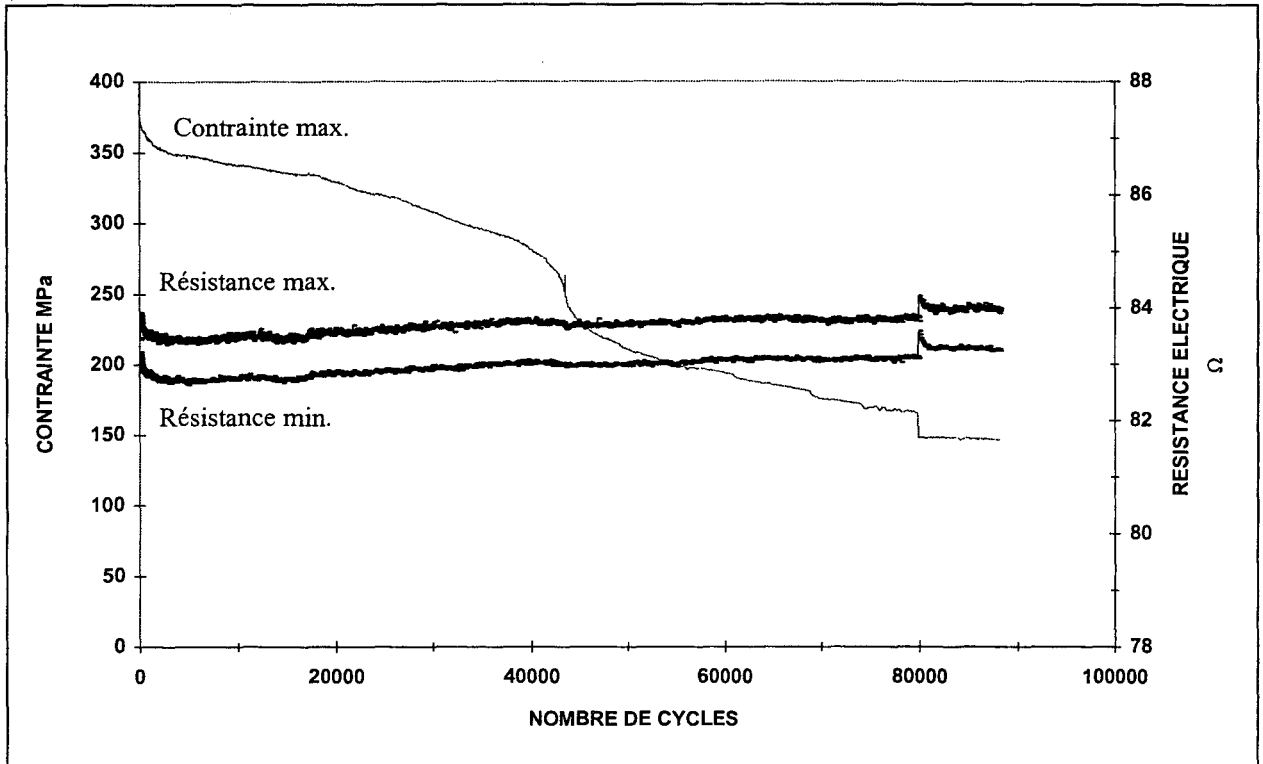
Un écart de résistance électrique est visible, dès les premiers cycles entre la résistance électrique maximale et la résistance minimale. En effet pour  $\sigma_{\max} = 75 \% \sigma_{r \text{ statique}}$ , on se situe à un taux de déformation (cf. fig. 3-26) à la limite des premières ruptures des fibres de carbone du capteur. Les résistances électriques minimales et maximales restent ensuite globalement constantes au cours de l'essai. La mèche de carbone à 2,1 % d'allongement à la rupture permet d'indiquer que l'éprouvette est endommagée, mais ne possède donc pas une sensibilité suffisante pour fournir des informations sur l'augmentation de l'endommagement de l'éprouvette (chute du module de 77 %), au cours de l'essai de fatigue.



**Fig. 3-64 : Courbes obtenues en fatigue à amplitude de flèche constante avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 2,1 %**

Sur la figure 3-65 sont présentées les courbes obtenues avec des fibres de carbone 1,5/1,7 % d'allongement à la rupture. Les deux courbes de résistance électrique montrent que dès le premier cycle, il y a rupture de certaines fibres de carbone, d'où la différence entre les résistances électriques maximales et minimales. En effet pour  $\sigma_{\max} = 75 \% \sigma_{r \text{ statique}}$ , on se situe à un taux de déformation (cf. fig. 3-27) tel que la réponse électrique du capteur est nettement amorcée. Ensuite les résistances électriques maximales et minimales diminuent légèrement, ce qui peut être expliqué par la remise en contact progressive des fibres rompues avec des fibres d'une couche supérieure du fait d'un effet de relaxation de contrainte. Au-delà entre 15 000 et 80 000 cycles, on constate une augmentation très progressive de la résistance électrique, puis intervient à nouveau une rupture de fibres se traduisant par une brusque augmentation de la résistance électrique, suivie d'une chute progressive de la résistance électrique qui conserve

néanmoins un niveau plus élevé qu'auparavant. On notera également que la rupture des fibres de carbone entraîne une discontinuité de la courbe contrainte/déformation. Dans le cas présent, la mèche de carbone apporte une réponse significative (outre sa réponse initiale) après une chute de module de 56 %, ce qui intervient trop tardivement pour être réellement utile. La duplication de l'essai dans les mêmes conditions sur une seconde éprouvette montre que les phénomènes observés sont reproductibles, une brusque augmentation de résistance électrique étant observée pour une chute de module du même ordre de grandeur : 51 %.



**Fig. 3-65 : Courbes obtenues en fatigue à amplitude de flèche constante avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 1,5/1,7 %**

Pour une éprouvette instrumentée avec une mèche de carbone à 0,6 % d'allongement à la rupture, à  $\sigma_{\max} = 75 \% \sigma_{r \text{ statique}}$ , on se situe à un niveau de déformation tel que le capteur travaille dans sa zone de réponse optimale (cf. fig. 3-28). Les courbes de résistance électrique augmentent de façon continue lors de l'essai de fatigue et avec une amplitude beaucoup plus importante que précédemment (cf. fig. 3-66). Par ailleurs, il existe une certaine corrélation entre les pentes des courbes de résistance électrique et de contrainte. Initialement (zone 1), les deux courbes ont une pente très prononcée, qui devient ensuite plus faible (zone 2) pour finir par s'accroître à nouveau (zone 3). Ce dernier effet est surtout visible sur la courbe de résistance électrique minimale. Cette corrélation peut s'expliquer par la baisse de la contrainte exercée consécutivement à la rupture des fibres de carbone du capteur intégré.

Sur le graphique 3-67 est mis en évidence l'allure de la courbe de résistance électrique en fonction du temps qui a pratiquement la même forme que la courbe de la contrainte en fonction du temps : une courbe sinusoïdale de période 1 s. En effet, les fibres de carbone rompues vont plus ou moins revenir en contact entre elles en fonction du niveau de contrainte exercée au cours d'un cycle de sollicitation, d'où la corrélation entre les courbes de la résistance électrique et de la contrainte en fonction du temps.

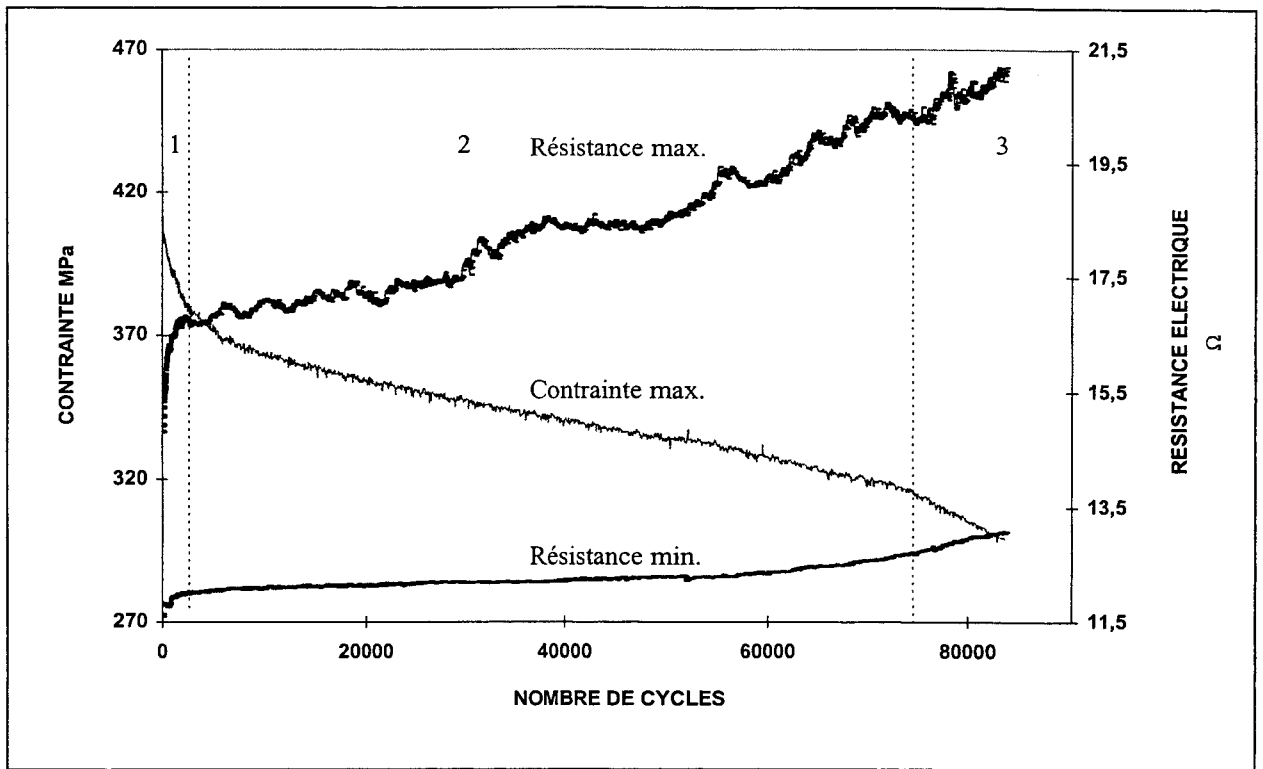


Fig. 3-66 : Courbes obtenues en fatigue à amplitude de flèche constante avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 %

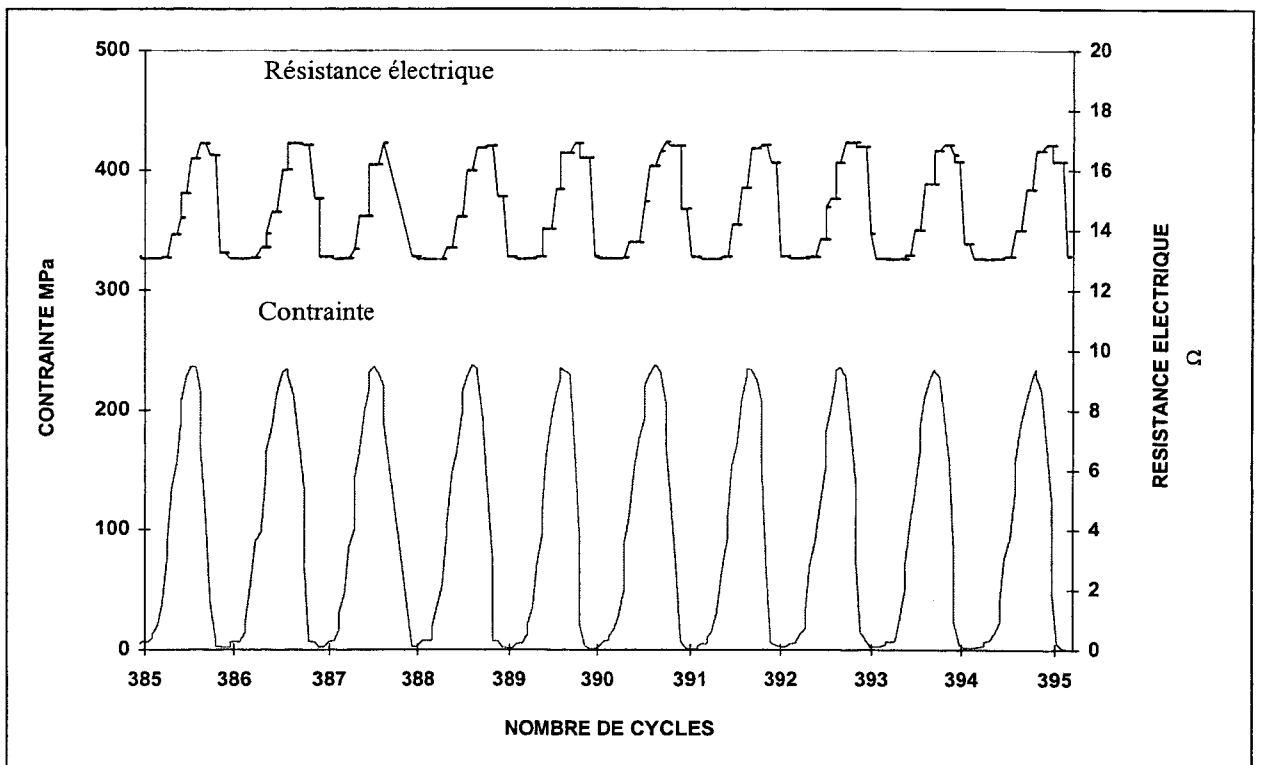
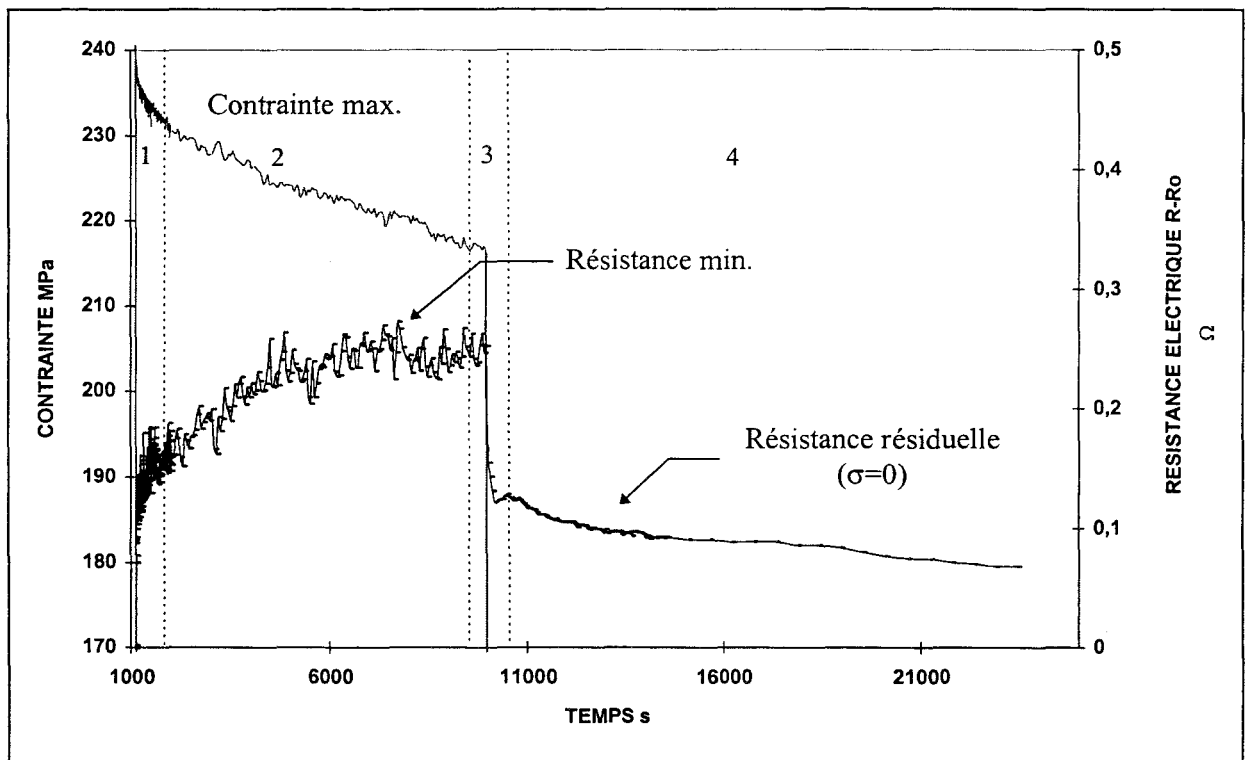


Fig. 3-67 : Courbes de la résistance électrique et de la contrainte en fonction du temps lors d'un essai de fatigue à amplitude de flèche constante (mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 %)

### 3.2.2.2.1.2. Etude de la résistance électrique résiduelle lors d'un essai de fatigue à amplitude de flèche constante

Afin d'étudier l'évolution de la résistance électrique résiduelle un essai de fatigue est réalisé sur une éprouvette instrumentée d'une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 %, en arrêtant l'essai après 10, 100, 1 000, 10 000 et 100 000 cycles. La contrainte maximale initiale est fixée comme précédemment à 75 % de  $\sigma_r$  statique. Les valeurs de la résistance électrique résiduelle sont relevées deux heures après la suppression de la contrainte, la résistance électrique résiduelle ne correspondant pas exactement à la résistance électrique minimale comme le montre la figure 3-68. Sur cette figure quatre zones peuvent être définies :

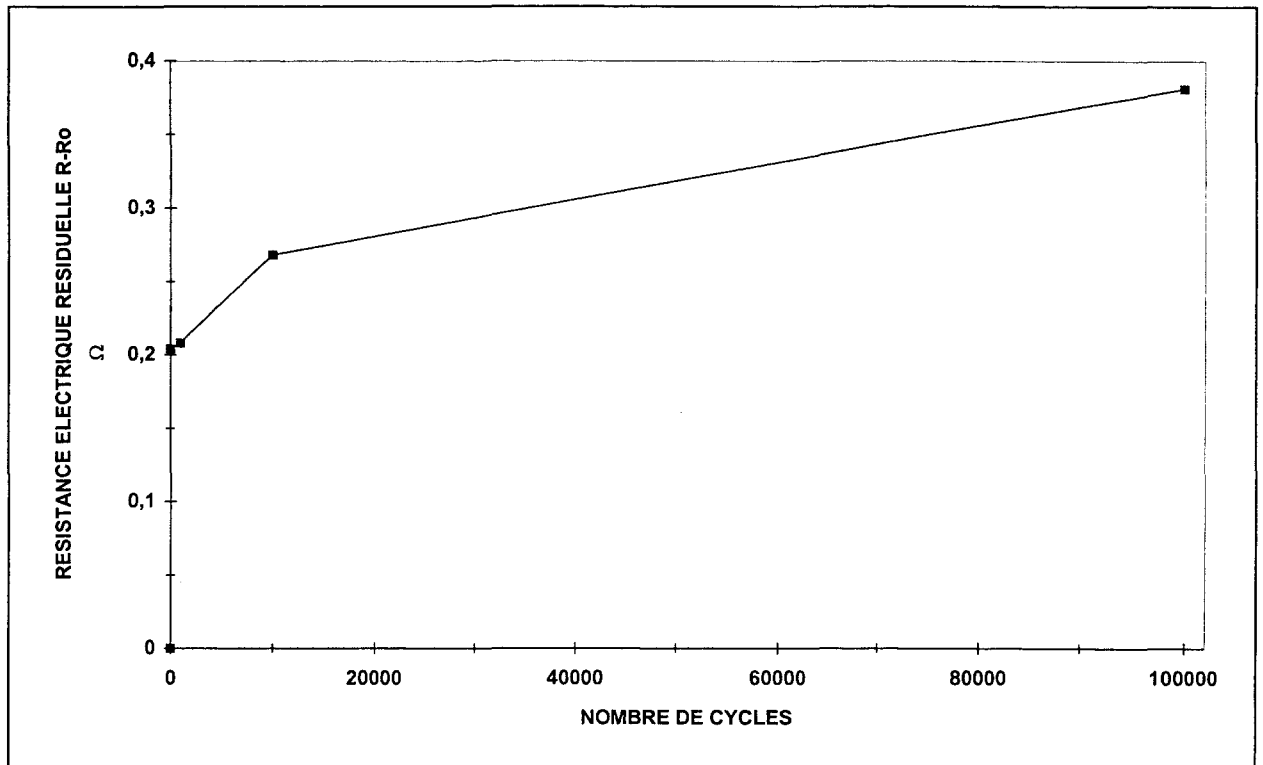
- Lors de la mise sous contrainte, l'augmentation brusque de la résistance électrique minimale est due aux premières ruptures de fibres, mais aussi au fait que l'éprouvette à cette fréquence de sollicitation ne peut pas revenir complètement à son état de repos, ce qui entraîne une perte du contact électrique entre les fibres cassées (zone 1).
- Durant le temps de l'essai la résistance électrique minimale augmente en raison de la rupture progressive de nouvelles fibres (zone 2).
- Lorsque la contrainte est supprimée une forte chute de la résistance électrique minimale est observée, qui est due à la remise en contact partielle des fibres rompues entre elles au moment où l'éprouvette reprend sa position initiale (zone 3).
- Ensuite, une diminution progressive de la résistance électrique est notée, conséquence de phénomènes de recouvrance viscoélastique dans le matériau (zone 4). L'éprouvette ne retrouve pas instantanément son état initial et continue à se déformer très faiblement au cours du temps pour retrouver son état premier.



**Fig. 3-68 : Variation de la résistance électrique minimale pour un essai de fatigue à amplitude de flèche constante (mèche d'allongement à la rupture 0,6 %)**

Dans le cas présenté, La résistance électrique résiduelle est inférieure d'environ  $0,1 \Omega$  à la résistance électrique minimale enregistrée sous une fréquence d'1 Hz.

L'évolution de la résistance électrique résiduelle en fonction des différentes étapes de l'endommagement en fatigue est présentée sur la figure 3-69. La principale augmentation de la résistance électrique résiduelle s'effectue dès les premiers cycles (50 % de l'augmentation de la résistance électrique résiduelle s'effectue pendant les dix premiers cycles). Ensuite l'augmentation de la résistance électrique résiduelle se fait plus progressivement.

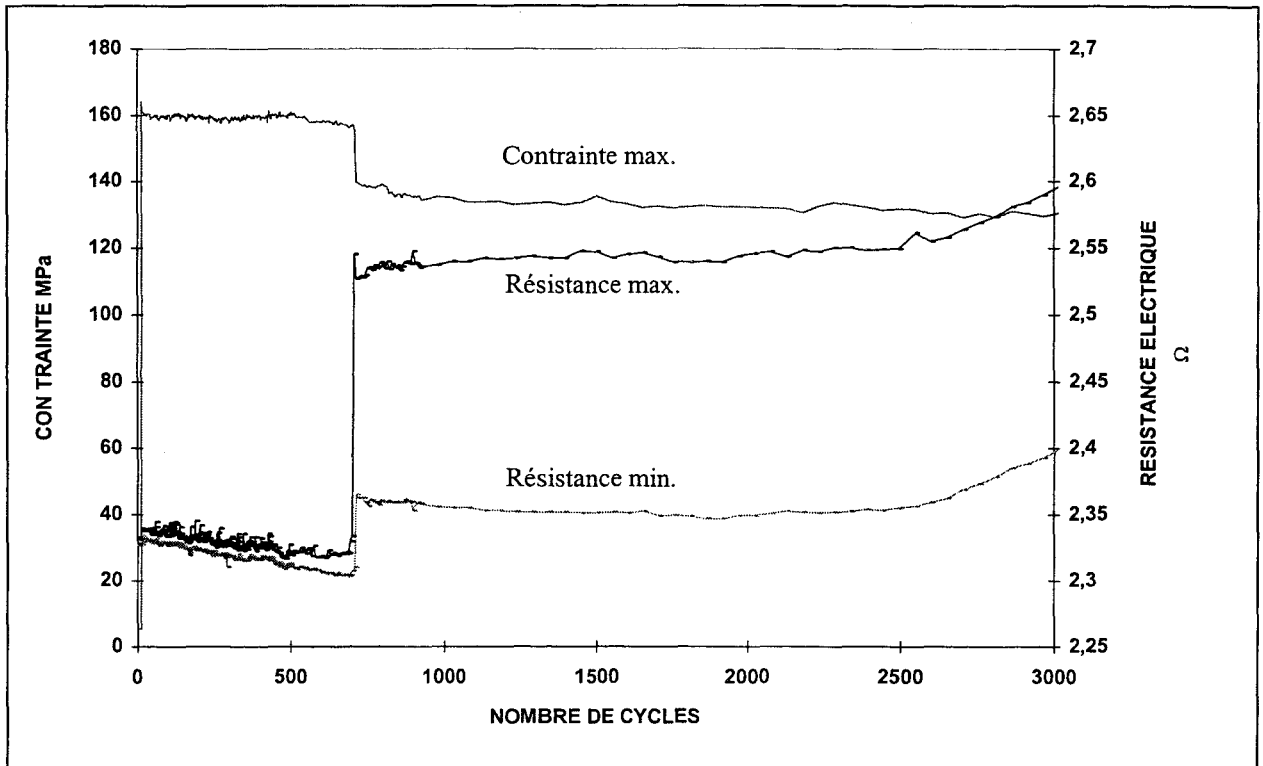


**Fig. 3-69 : Augmentation de la résistance électrique résiduelle durant un essai de fatigue à amplitude de flèche constante (mèche d'allongement à la rupture 0,6 %)**

#### 3.2.2.2.1.3. Essais à contrainte initiale prise à 46% de la contrainte à la rupture de l'éprouvette en statique

Lors des essais de fatigue précédents, compte-tenu du niveau de chargement élevé appliqué, bien au-delà du régime élastique du composite étudié et du seuil de premier endommagement du capteur, la rupture de la mèche de carbone ainsi que l'endommagement du composite hôte interviennent toujours lors du premier cycle. Dans le cadre de l'application de la mèche de carbone comme capteur préventif d'endommagement, il convient de se placer à un niveau de sollicitation plus faible, se situant avant la fin du régime élastique du matériau. Pour l'essai de la figure 3-70, la contrainte initiale est fixée ainsi à 46 % de la contrainte à la rupture de l'éprouvette verre/résine, ce qui correspond à 84 % de la contrainte à la limite du régime élastique. Le niveau de contrainte initiale choisi se situe juste en dessous de la contrainte correspondant à l'allongement à la rupture critique de la mèche de carbone utilisée ici (0,36 % d'allongement à la rupture). Lors des 700 premiers cycles, la mèche de carbone ne

répond pas, elle n'est pas encore endommagée. La réponse du capteur intervient après une perte progressive de module de l'éprouvette de 4,5 %. Elle se traduit par une augmentation des résistances électriques (augmentation plus faible pour la résistance électrique minimale), ainsi que par une chute du module de l'éprouvette de 10 %.



**Fig. 3-70 : Courbes obtenues en fatigue à amplitude de flèche constante avec des fibres de carbone d'allongement à la rupture de 0,36 %**

Une telle courbe, où les premières ruptures de fibres de la mèche de carbone interviennent au cours de l'essai de fatigue est relativement difficile à obtenir. Généralement la mèche de carbone casse dès les premiers cycles de l'essai ou ne s'endommage pas en cours d'essai. En effet, la rupture des fibres de carbone est gouvernée essentiellement par la déformation imposée à celles-ci : la rupture est effective quand la déformation dépasse le seuil d'allongement à la rupture de la mèche de carbone. Dans le cas des essais effectués à amplitude de flèche imposée, la déformation maximale subie par la mèche de carbone reste toujours identique. L'augmentation de la résistance électrique des mèches de carbone constaté en cours d'essai ne provient que de la fatigue propre des fibres de carbone, qu'il reste difficile de corréler avec l'endommagement du matériau hôte. En revanche dans le cas d'une sollicitation à contrainte imposée, pour laquelle les déformations de la structure augmentent progressivement, on peut espérer obtenir des ruptures et des réponses électriques plus significatives des mèches de carbone utilisées comme capteur de suivi d'endommagement.

### 3.2.2.2.2. Fatigue à amplitude de contrainte imposée (traction)

Les essais sont réalisés, non plus en flexion trois points mais en traction, ce qui permet d'imposer un état de contrainte simple (les conditions expérimentales sont détaillées dans le paragraphe § 2-2-6-2). Le niveau de la contrainte imposée est choisi de telle sorte qu'il soit possible de détecter les premières ruptures de la mèche de carbone faisant office de capteur. On se place donc dans les conditions de réponse optimale du capteur : réponse nulle en début d'essai puis, après le seuil de rupture de la mèche de carbone, augmentation progressive de sa résistance électrique.

#### 3.2.2.2.2.1. Mèche de carbone d'allongement à la rupture 1,5/1,7 %

Un premier essai est réalisé avec une mèche de carbone d'allongement à la rupture 1,5/1,7 % à une fréquence de 0,4 Hz. Le niveau de contrainte choisi est inférieur de 10 % à la contrainte de premier endommagement de la mèche de carbone et supérieur de 8 % à la contrainte de fin de régime élastique du matériau verre/résine hôte, comme le montre la figure 3-71, ce qui correspond à 52 % de la résistance à la rupture de l'éprouvette. Pour les mèches d'allongement à la rupture 1,5/1,7 %, l'augmentation de résistance électrique due aux premières ruptures de fibres est difficile à mettre en évidence, d'une part parce que celles-ci interviennent très progressivement pour ce type de fibres, et d'autre part parce qu'il existe une contribution importante de l'élongation des fibres de carbone visualisée par la différence importante entre les résistances électriques minimales et maximales sur un cycle. Une première augmentation de très faible amplitude apparaît vers le 3 700<sup>ème</sup> cycle pour une déformation de 1,18 %. Lors des essais statiques, la déformation moyenne trouvée pour les premières ruptures de fibres est pratiquement identique (1,10 %). Une deuxième augmentation de résistance électrique beaucoup plus nette intervient au 9 200<sup>ème</sup> cycle pour une déformation de 1,22 %.

Un essai de fatigue similaire effectué avec un niveau de contrainte de 20 % inférieur à la contrainte de première rupture de la mèche de carbone ne conduit quant à lui à aucune variation de résistance électrique imputable à des ruptures de fibres sur une plage de 10 000 cycles.



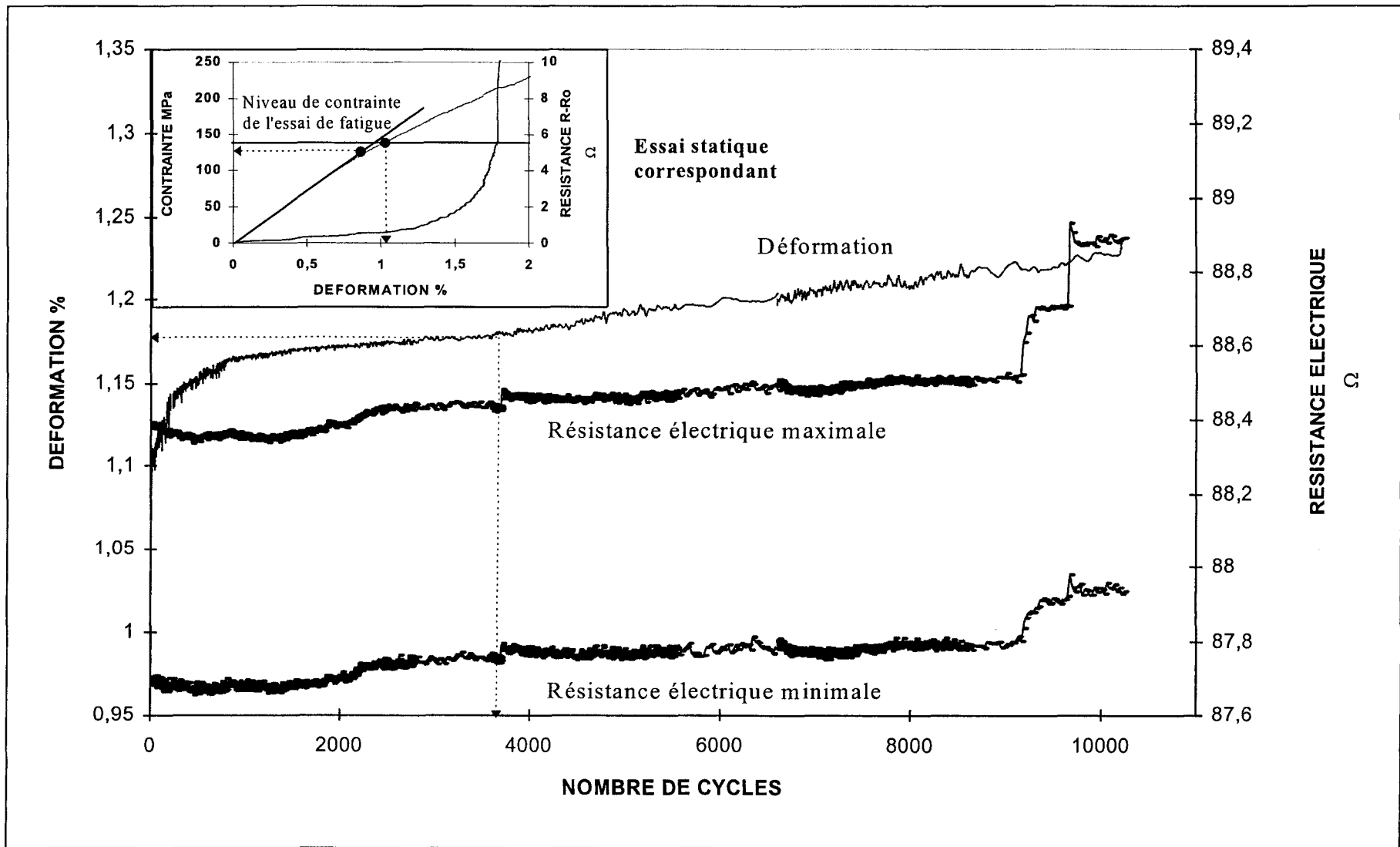
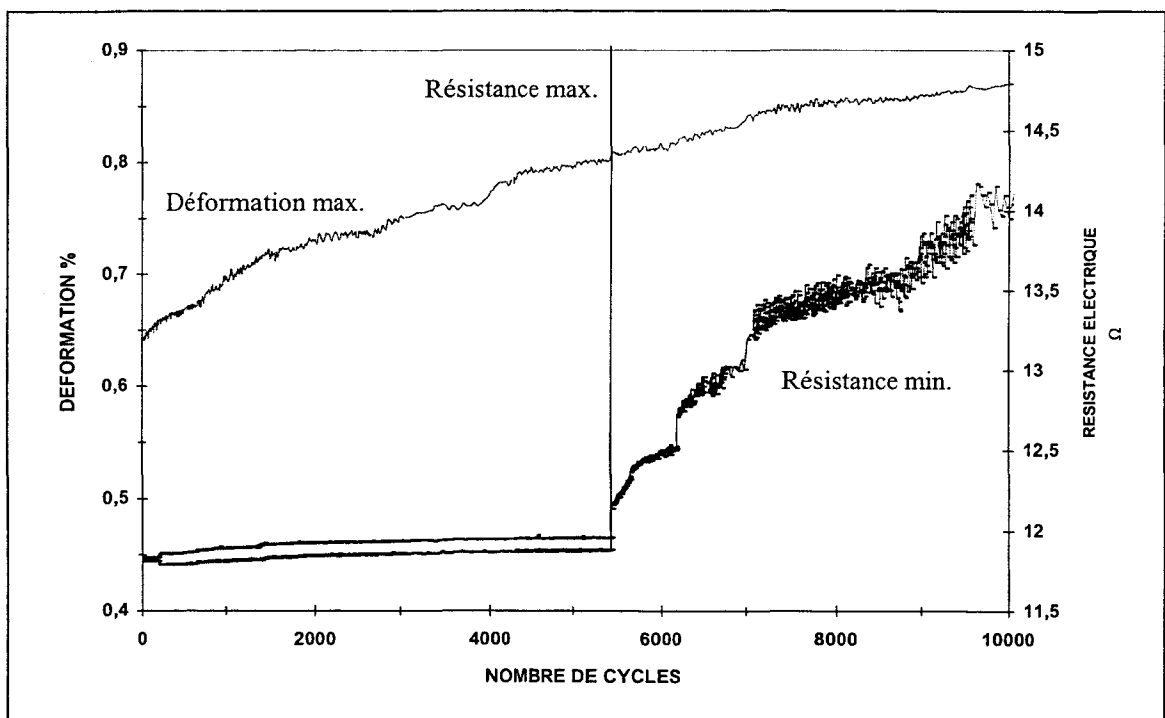


Fig. 3-71 : Essai de fatigue dynamique à amplitude de contrainte constante pour une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 1,5/1,7 %

## 3.2.2.2.2. Mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 %

Un essai de fatigue analogue est réitéré sur une éprouvette instrumentée d'une mèche de carbone d'allongement à la rupture 0,6 % et à une fréquence de 0,5 Hz. Le niveau de contrainte choisi est inférieur de 20 % à la contrainte de premier endommagement du capteur résistif et inférieur de 18 % à la contrainte de fin de régime élastique du matériau hôte (cf. fig. 3-73), ce qui correspond à 35 % de la résistance à la rupture statique de l'éprouvette. Avant 5 500 cycles les résistances électriques minimales et maximales sont pratiquement égales. Au-delà, la rupture des premières fibres de la mèche de carbone entraîne une augmentation brutale de la résistance électrique maximale. L'augmentation de résistance électrique intervient pour une déformation maximale de l'éprouvette de 0,80 %, ce qui correspond à une chute de son module de 20 %. La réponse du capteur est d'amplitude beaucoup plus intense que celle des mèches d'allongement à la rupture 1,5/1,7 %, ce qui permet de détecter très facilement le premier signal du capteur. La rupture de la mèche intervient pour une déformation pratiquement égale à la valeur moyenne de déformation mesurée lors des essais statiques (0,81 %). Donc pour la mèche de carbone considérée, l'effet du cyclage sur la déformation correspondant à l'amorce de l'augmentation de la résistance électrique du capteur est négligeable.

La figure 3-72 permet de visualiser l'augmentation de la résistance électrique minimale, augmentation de 2,34  $\Omega$  après 10 000 cycles. La résistance électrique résiduelle après 10 000 cycles, mesurée après un délai de 48 h de repos, est de 1,26  $\Omega$ . La différence importante mesurée entre la résistance minimale et la résistance résiduelle est due au fait que l'éprouvette n'a pas le temps de revenir complètement à sa position de repos au cours du cyclage. Il y a donc des effets de recouvrance après suppression de la sollicitation.



**Fig. 3-72 : Essai de fatigue en traction à amplitude de contrainte constante (mèche d'allongement à la rupture 0,6 %), mise en évidence de la résistance électrique minimale**

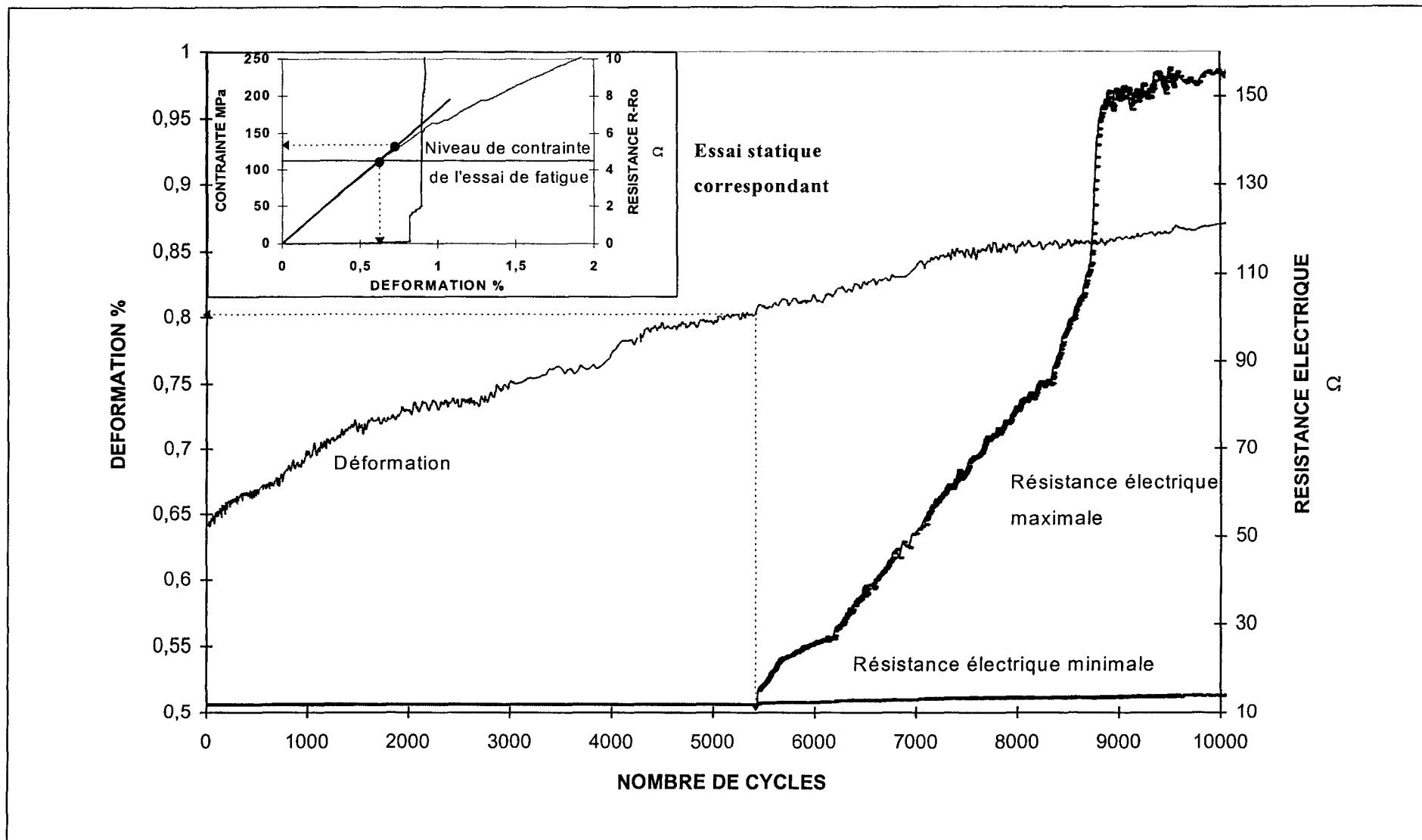


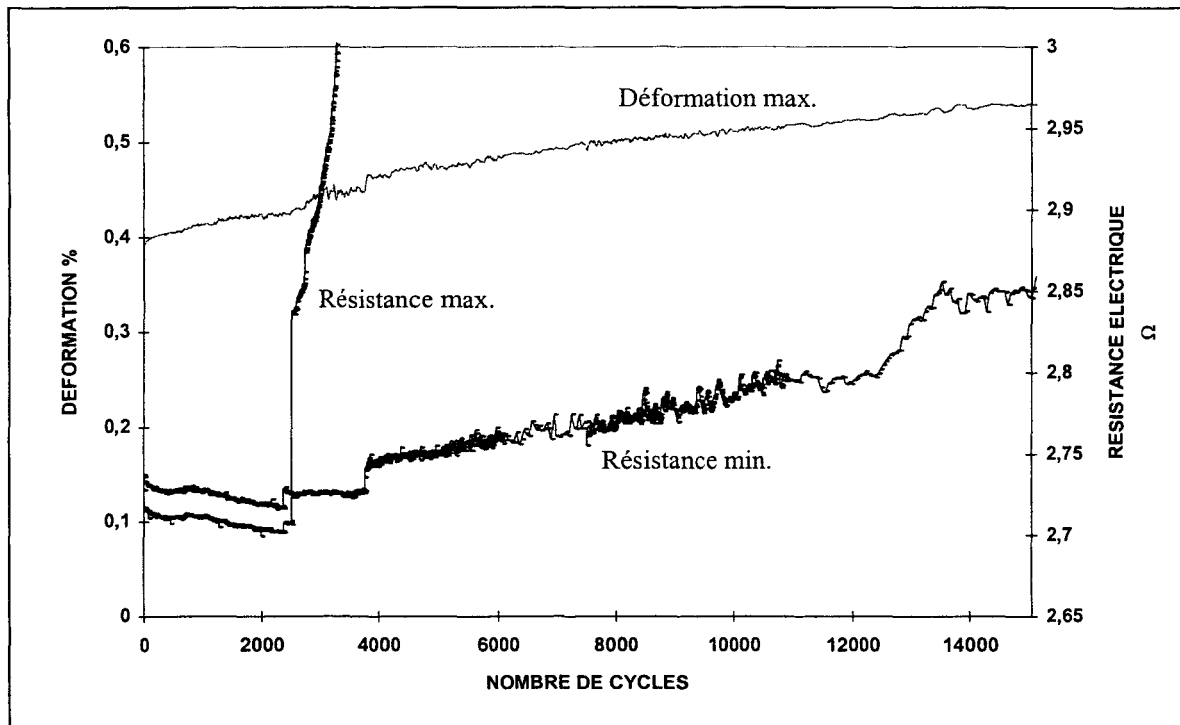
Fig. 3-73 : Essai de fatigue dynamique à amplitude de contrainte constante pour une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 %

## 3.2.2.2.3. Mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,36 %

Une dernière validation est réalisée à une fréquence de 0,7 Hz sur une éprouvette instrumentée d'une mèche d'allongement à la rupture de 0,36 %. Le niveau de contrainte choisi est inférieur de 5 % à la contrainte de premier endommagement du capteur résistif et inférieur de 37 % à la contrainte de fin de régime élastique du matériau hôte, ce qui correspond à 27 % de la résistance à la rupture statique de l'éprouvette. La réponse du capteur d'endommagement intervient après 2 500 cycles (cf. fig. 3-75) pour une chute du module de l'éprouvette de 7 % et pour une déformation de 0,41 %, soit une déformation légèrement inférieure à la déformation moyenne de rupture en statique (0,45 %). La valeur trouvée reste cependant dans l'intervalle d'écart-type des déformations de premières ruptures de fibres déterminé pour les essais statiques.

Le choix d'un niveau de contrainte plus faible, 10 % en dessous de la contrainte de premières ruptures de la mèche de carbone en statique, ne conduit à aucune réponse du capteur après 10 000 cycles.

La figure 3-74 permet de voir que la résistance électrique minimale présente également une augmentation, bien que nettement moins importante que celle de la résistance électrique maximale en raison des remises en contacts partielles des fibres de carbone rompues entre elles. Une augmentation de résistance électrique minimale de  $0,125 \Omega$  est enregistrée après 10 000 cycles.



**Fig. 3-74 : Essai de fatigue en traction à amplitude de contrainte constante (mèche d'allongement à la rupture de 0,36 %), mise en évidence de la résistance électrique minimale**

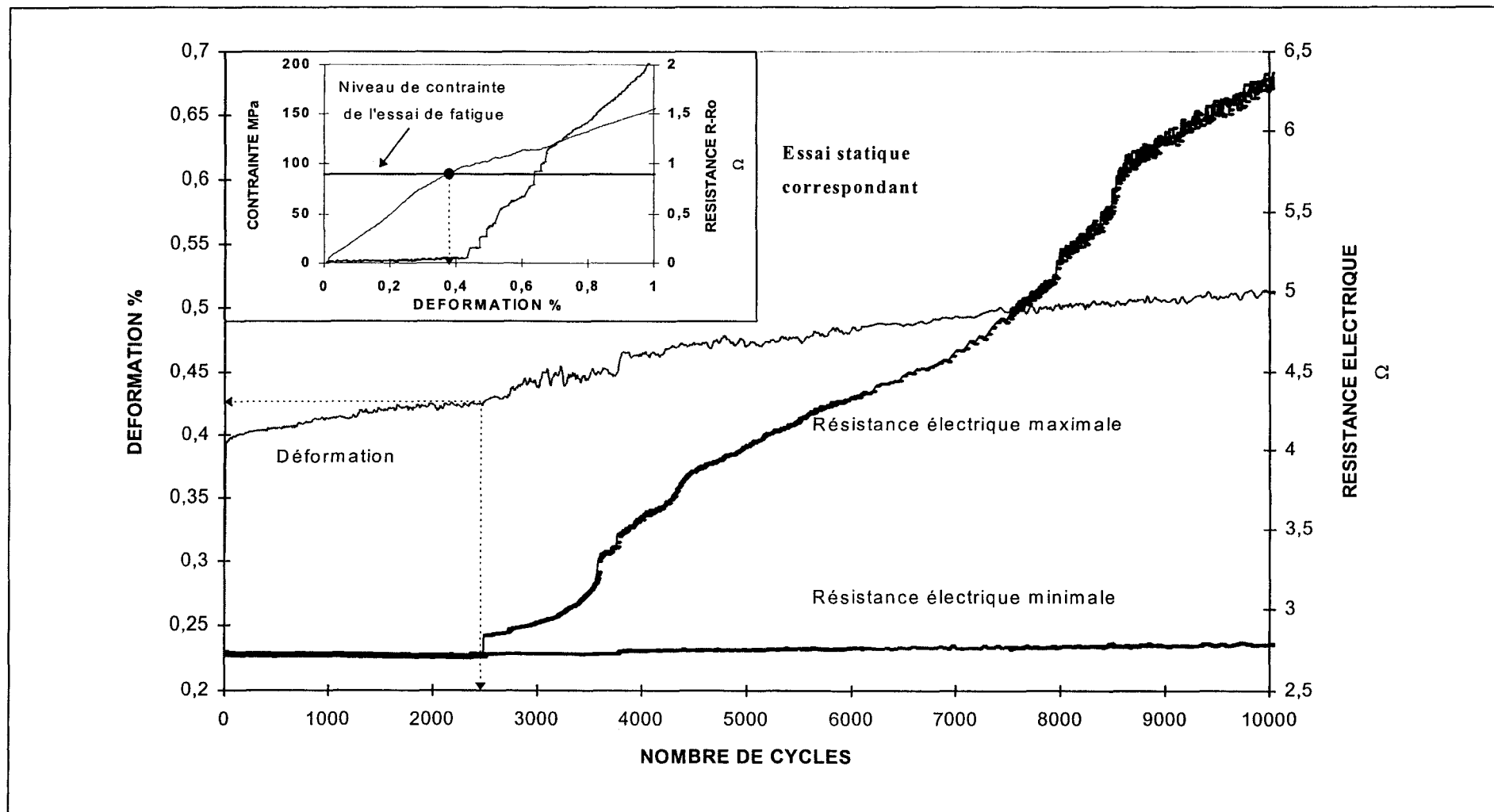


Fig. 3-75 : Essai de fatigue dynamique à amplitude de contrainte constante pour une mèche de carbone

d'allongement à la rupture de 0,36 %

### 3.2.2.2.3. Synthèse des essais de fatigue

En comparant les essais de fatigue à amplitude de contrainte imposée et amplitude de déformation imposée, il apparaît clairement que le capteur est avant tout sensible à l'augmentation de la déformation. En effet, comme on pouvait s'y attendre, les augmentations de résistance électrique du capteur sont beaucoup plus importantes pour les essais à amplitude de contrainte imposée (pour lesquels la déformation maximale augmente progressivement) que pour les essais à amplitude de déformation imposée (où la déformation maximale reste constante).

Les essais à amplitude de déformation imposée montrent néanmoins que la fatigue propre de la mèche de carbone peut entraîner une augmentation de sa résistance électrique à déformation maximale constante qui provient d'une fragilisation progressive des fibres de carbone au cours du cyclage. Une étude plus poussée de ce phénomène pourrait permettre une corrélation entre l'augmentation de la résistance électrique due à la fatigue propre du capteur et l'endommagement du matériau hôte en fatigue.

Cependant, l'effet de la fatigue propre de la mèche de carbone reste faible comparé à l'augmentation de résistance électrique du capteur provenant de l'augmentation de la déformation imposée. Ainsi, l'effet de cyclage affecte très peu la valeur de déformation correspondante à la valeur de première rupture des fibres de la mèche de carbone qui est pratiquement identique pour les essais de traction en statique et en dynamique.

## 3.3. Conclusion de l'étude sur éprouvettes

L'étude en traction a permis de valider les capteurs résistifs développés et de déterminer leurs principes de base d'utilisation. La réponse électrique du capteur est conditionnée par la déformation subie par la mèche de carbone. Le capteur réagit pour une déformation critique qui lui est propre et qui est indépendante de l'état d'endommagement du matériau hôte. Il convient donc d'optimiser le choix de la mèche de carbone à utiliser pour détecter efficacement l'endommagement du matériau hôte.

Après validation du capteur pour une traction monoaxiale, les essais en flexion, délaminage et fatigue ont démontré sa capacité à réagir pour ces différents types de sollicitation. L'allure des courbes de comportement résistance électrique/déformation obtenue est différente en fonction de la sollicitation que subit le capteur, ce qui peut permettre qualitativement d'après la réponse électrique du capteur de déterminer le type de contrainte exercée prioritairement sur le capteur.

Par ailleurs, l'existence d'une résistance électrique résiduelle sous chargements cycliques met en évidence le caractère partiellement irréversible de la réponse électrique de la mèche de carbone. Cette résistance résiduelle peut servir de mémoire de l'endommagement du matériau hôte, après un choix judicieux de la mèche de carbone utilisée comme capteur. Le

capteur développé ne réagit donc pas simplement comme un capteur de déformation instantanée (type jauge d'extensométrie), mais permet de traduire le caractère irréversible de l'endommagement. En pratique, la résistance électrique résiduelle autorise un contrôle de l'endommagement du matériau de manière périodique et pas nécessairement en continu.

Les résultats obtenus lors de l'étude sur éprouvettes permettent une caractérisation du comportement électrique des différentes mèches de carbone utilisées, pour divers types de sollicitation. Ils montrent que différentes procédures de mise en oeuvre des capteurs sont applicables en vue d'une utilisation sur pièces industrielles. Ce sont ces différentes possibilités et éventuelles limites d'utilisation du capteur qui vont être les principaux thèmes de discussion du chapitre suivant.

**CHAPITRE IV :**  
**DISCUSSION ET**  
**DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL**



# **CHAPITRE IV :**

## **DISCUSSION ET DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL**

### **4.1. Analyse de la réponse du capteur**

#### **4.1.1. Qu'est-ce que mesure réellement le capteur?**

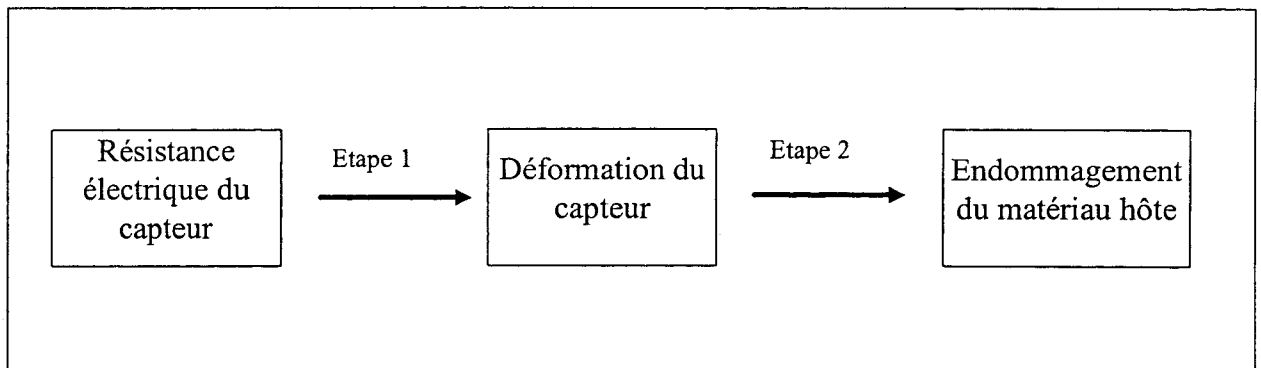
L'information fournie par le capteur correspond à la résistance électrique de la mèche de carbone insérée dans la pièce à contrôler et peut être reliée à la déformation de la mèche de carbone (effet de l'élongation des fibres) et à son endommagement (effet de la rupture des fibres). Cependant, l'information recherchée n'est pas la déformation ou l'endommagement du capteur mais l'endommagement du matériau hôte dans lequel est intégré le capteur. Il faut alors savoir s'il est possible d'assimiler ou de relier la déformation et l'endommagement du capteur avec ceux du matériau hôte. Il semble logique de considérer que si le capteur présente une déformation ou un endommagement quelconque, c'est qu'il a subi une sollicitation extérieure qui est aussi ressentie par le matériau hôte. Cependant, il reste à établir une relation entre les effets occasionnés par cette sollicitation extérieure sur le capteur et ceux occasionnés sur le matériau hôte.

#### **4.1.2. Relation entre résistance électrique mesurée par le capteur et endommagement du matériau**

Il semble raisonnable de considérer la déformation subie par le capteur et celle du matériau hôte dans une zone voisine du capteur comme identiques. En effet le diamètre des fibres de carbone utilisées est très faible (10  $\mu\text{m}$ ) et du même ordre de grandeur que celui des fibres de verre qui servent de renfort. Il n'y a donc pas de concentration de contrainte particulière autour du capteur susceptible d'entraîner des effets non représentatifs sur l'ensemble du matériau. De plus le capteur est intégré directement dans la matrice au moment de la fabrication de la pièce et les fibres de carbone utilisées ont comme fonction première de renforcer des matrices, organiques notamment. Il ne se pose donc pas de problèmes d'interface entre le capteur et le matériau hôte, sauf pour des conditions extrêmes pour lesquelles les mèches de carbone sont largement fissurées. Jusqu'à un niveau de déformation supérieur à celui nécessaire à l'application envisagée, le capteur est donc solidaire de la matrice et se déforme avec elle, sans phénomène de glissement ou de décohésion de l'interface capteur/matériau hôte. Les déformations du capteur et celles d'une zone voisine du matériau hôte peuvent donc être considérées comme semblables.

En revanche, l'endommagement de la mèche de carbone et celui du matériau hôte n'interviennent pas nécessairement pour le même niveau de déformation. Il convient donc, au préalable de connaître la déformation limite admissible par le matériau hôte avant que son endommagement soit considéré comme critique. Pour cela, des essais mécaniques, comme nous l'avons fait au chapitre III, peuvent être effectués sur des éprouvettes et la déformation maximale acceptable être déterminée par la fin de linéarité des courbes contrainte/déformation. L'utilisation de l'émission acoustique peut aussi être envisagée, un seuil fixé de coups cumulés donne alors par exemple la limite de déformation acceptable avant l'endommagement critique. Pour des pièces industrielles complexes, un calcul de structure par éléments finis donnant des cartographies des déformations maximales admissibles correspondant aux premiers endommagements du matériau peut être effectué. Ensuite, il convient de choisir les caractéristiques des mèches de carbone devant servir de capteur d'endommagement en fonction des déformations limites déterminées, notamment en jouant sur les allongements à la rupture des mèches de carbone.

Différentes approches peuvent être adoptées pour traiter la réponse des mèches de carbone. Il s'agit toujours cependant de mesurer la résistance électrique, puis de l'associer à la déformation du capteur (assimilée à celle du matériau hôte) et enfin de relier celle-ci à l'endommagement proprement dit du matériau hôte.



**Fig. 4-1 : De la réponse électrique du capteur à l'endommagement du matériau hôte.**

L'étape 1 s'effectue en se basant sur les courbes résistance électrique/déformation types trouvées pour les mèches de carbone au cours des essais de caractérisation sur éprouvettes et en considérant les déformations de la mèche de carbone et celles du matériau hôte comme identiques. (Les informations données par la mèche de carbone ne concernent pas nécessairement la déformation instantanée, mais peuvent nous renseigner sur l'état de déformation maximale atteint précédemment par le composite par l'utilisation de la résistance électrique résiduelle.)

L'étape 2 est réalisée en déterminant les déformations limites correspondant aux différents niveaux d'endommagement du matériau hôte. Dans le cas des essais effectués sur éprouvettes, cette information est donnée par la courbe d'émission acoustique et par la fin du régime élastique du matériau, visualisé sur la courbe contrainte/déformation.

Ces deux étapes permettent de relier l'augmentation de la résistance électrique de la mèche de carbone à l'endommagement du matériau hôte.

### 4.1.3. Les différentes manières de traiter la réponse d'un capteur pour un chargement en traction croissant dans le sens de la mèche

#### 4.1.3.1. Effet fusible

##### 4.1.3.1.1. Pièce instrumentée sous charge

Le capteur est traité comme un capteur tout ou rien dont la réponse électrique est considérée comme négative avant la rupture des fibres de carbone et comme positive après. Lors de l'utilisation du capteur, il convient d'adapter la mèche de carbone utilisée afin que la réponse électrique ait lieu juste au moment désiré, c'est à dire juste avant les premiers endommagements annonciateurs d'une remise en cause de l'intégrité de la structure contrôlée. Pour cela il faut choisir avec soin l'allongement à la rupture des fibres de carbone utilisées comme capteur, en gardant à l'esprit que l'allongement à la rupture donné par le fournisseur ne correspond pas nécessairement à la déformation de fin de linéarité des courbes résistance électrique/déformation déterminées expérimentalement, lors des essais de traction sur éprouvettes. La mèche de carbone joue alors un rôle de fusible, une réponse positive du capteur signifie que la structure contrôlée a subi un endommagement dépassant le niveau critique et qu'il convient de vérifier son intégrité et éventuellement de la remplacer.

Les mèches de carbone présentent une faible augmentation de résistance électrique avant la rupture des fibres puis un accroissement brutal de leur résistance électrique au moment de la rupture. Concrètement, il suffit de fixer une valeur de résistance électrique limite qui dépend de la mèche considérée. Ensuite, une chaîne d'acquisition permet de mesurer en temps réel la résistance électrique de la mèche de carbone et chaque mesure est comparée à la valeur limite choisie. Un signal d'alarme se déclenche si cette résistance électrique limite est dépassée.

Il est possible aussi de prendre comme signal limite non pas une valeur donnée de la résistance électrique mais le changement de pente de la courbe de la résistance électrique en fonction du temps. Cela permet de s'affranchir de la valeur initiale de la mèche de carbone, qu'il faut connaître pour chaque mèche utilisée dans le cas précédent. Pour cela, il faut définir une valeur de pente critique  $\Delta R/\Delta t$  correspondant à la pente caractéristique de la rupture des fibres (déterminée lors d'essais de traction par exemple). Ensuite, l'acquisition de la résistance électrique de la mèche de carbone est déclenchée à intervalle de temps régulier et les couples  $R_{t_{i+1}} - R_{t_i}$  sont comparés à la valeur limite et comme précédemment un signal d'alarme est déclenché si la pente mesurée est supérieure à la pente limite. Avec cette méthode l'acquisition doit se faire en continu ou à intervalle de temps très rapproché car la réponse prise en compte n'intervient que durant la période où il y a variation de la résistance électrique.

#### 4.1.3.1.2. Utilisation de la résistance électrique résiduelle

Lorsqu'il y a rupture des fibres de carbone une partie de la réponse du capteur est irréversible, ce qui se traduit par la présence d'une résistance électrique résiduelle après suppression de la sollicitation imposée au matériau. L'acquisition des données peut donc se faire de façon périodique, ce qui permet de réduire les coûts en utilisant la même chaîne de mesure pour plusieurs mèches de carbone, connectées de façon cyclique les unes après les autres. Il faut savoir néanmoins que si la contrainte appliquée au temps  $t_1$  n'est plus présente à l'instant  $t_2$  de l'acquisition de la résistance électrique, l'amplitude de la résistance électrique résiduelle prise en compte sera beaucoup plus faible que la résistance électrique maximale présente au moment de la sollicitation. En effet, après suppression de la contrainte la résistance électrique résiduelle décroît au cours du temps en raison de la remise en contact partielle des fibres de carbone entre elles. Ce phénomène s'explique par la recouvrance élastique et viscoélastique de la matrice polymère.

Cependant, les essais effectués sur la variation de la résistance électrique résiduelle en fonction du temps montrent que celle-ci ne s'annule jamais totalement, ce qui permet donc d'utiliser des acquisitions périodiques, en prenant des seuils limites de résistance électrique faibles. Si l'état de chargement de la pièce à contrôler est inconnu, l'amplitude de la résistance électrique résiduelle étant assez faible, il convient d'utiliser des mèches de carbone qui présentent des nombres de filaments élevés afin de minimiser au maximum l'augmentation de la résistance des fibres due à l'élongation des fibres. Cela permet d'éviter toute ambiguïté lors de l'acquisition d'une mesure entre une résistance électrique due à l'élongation de la fibre, donc avant la rupture des fibres de carbone, et la mesure d'une résistance électrique résiduelle qui résulte d'une rupture des fibres.

#### 4.1.3.2. Utilisation de l'augmentation de la résistance électrique due à l'élongation des fibres

Pour certaines mèches de carbone de nombre de filaments inférieur à 3 000, les variations de la résistance électrique dues à l'élongation des fibres sont suffisamment importantes pour pouvoir être traitées par la chaîne de mesure dans des conditions acceptables. Cependant les variations de résistance électrique mesurées sont toujours inférieures à  $1 \Omega$ . Il faut donc un système de mesure précis, la meilleure solution étant le micro-ohmètre. Compte tenu de la très faible amplitude de la réponse du capteur, il convient particulièrement de veiller à optimiser les connexions entre le circuit d'acquisition et les mèches de carbone pour garantir l'absence de faux contacts potentiellement générateurs de perturbations sur les mesures. De plus, il convient de neutraliser l'effet perturbateur créé par les variations de température (cf. § 3-1-8). L'intérêt de cette méthode d'exploitation est que l'augmentation de la résistance électrique due à l'élongation des fibres peut être assimilée à une droite. Il est donc aisé de retrouver la déformation de la mèche à partir de la résistance électrique mesurée, soit en se basant sur les pentes de droite obtenues sur essais types, soit par le calcul à partir de l'équation suivante.

$$\Delta R_e = R_0 \varepsilon (1 + 2 \nu) \quad (3-4)$$

avec  $\Delta R_e$  : variation de la résistance électrique due à l'élongation des fibres  
 $\varepsilon$  : déformation du matériau  
 $R_0$  : résistance électrique initiale de la mèche de carbone.  
 $\nu$  : coefficient de Poisson des fibres de carbone

Cependant, un certain écart subsiste entre les pentes à l'origine des courbes expérimentales et les droites calculées (cf. § 4-2-1). Les mèches de carbone à utiliser préférentiellement pour ce type de mesures sont des mèches contenant un faible nombre de filaments qui induisent une pente à l'origine importante de la courbe résistance électrique/déformation. On note cependant que les mèches de nombre de filaments inférieur ou égal à 1 K présentent expérimentalement des dispersions importantes des mesures de résistance électrique en fonction de la déformation. De même, il est recommandé de choisir des mèches présentant un allongement à la rupture important, celles-ci permettant d'obtenir une plage de mesure, pour laquelle seule l'élongation des mèches de carbone intervient, plus importante. En effet, lorsque l'on se rapproche de la zone de rupture des fibres, l'erreur expérimentale devient de plus en plus importante du fait de la dispersion inévitable des valeurs d'élongation à la rupture des fibres (certaines fibres cassent bien avant la valeur moyenne de rupture de la mèche). De mêmes les erreurs seront importantes pour des déformations inférieures à 0,2 %, en raison de problèmes de tension initiale des fibres qui peuvent entraîner des précontraintes sur la mèche. Certaines fibres ne sont pas parfaitement tendues initialement et leur contribution à l'augmentation de la résistance électrique n'intervient qu'à partir d'un certain seuil de déformation.

L'intérêt de cette méthode est de pouvoir mesurer à tout moment et en temps réel à partir de la résistance électrique de la mèche de carbone la déformation subie par le matériau sur une certaine plage de mesures et à partir de très faibles déformations (capteur fiable à partir de 0,2 % de déformation). Il est alors possible de déterminer en continu le niveau d'endommagement correspondant de la structure à contrôler. La réponse électrique due à l'élongation des fibres étant réversible, il convient d'utiliser une acquisition continue sur une structure sous charge. En effet, si des mesures périodiques sont effectuées, elles donnent la déformation du matériau à l'instant de la mesure, alors qu'une déformation supérieure peut avoir été atteinte pendant l'intervalle de temps entre deux mesures. Cette méthode s'apparente donc à celle des jauges d'extensométrie classiques, tout en présentant l'avantage d'utiliser un capteur pouvant être facilement intégré à l'intérieur de la structure composite hôte, ce qui est pratiquement impossible avec une jauge de déformation classique.

#### **4.1.3.3. Utilisation de l'augmentation de la résistance électrique due à la rupture des fibres de carbone pour une acquisition en continu**

L'augmentation de la résistance électrique en fonction de la déformation imposée à la mèche de carbone s'effectue de manière plus ou moins progressive suivant la mèche de carbone considérée. En effet, les fibres de carbone contenues dans une mèche (entre 3000 et 12000) ne rompent pas toutes pour la même déformation mais suivant une certaine distribution. Celle-ci dépend d'une part de la tension initiale des fibres qui peut être différente d'une fibre à l'autre, mais surtout de la présence de défauts intrinsèques qui conditionnent la déformation à la rupture des fibres.

Il est intéressant d'utiliser cette distribution de rupture des fibres de carbone afin de déterminer la déformation du matériau en fonction de l'augmentation progressive de la résistance électrique de la mèche de carbone, ce qui permet de suivre l'évolution de l'endommagement du matériau hôte. Pour cela, il convient de modéliser la courbe résistance électrique/déformation moyenne obtenue (cf. § 4-2-2) lors des essais de caractérisation du comportement de la mèche de carbone pour la sollicitation désirée. Cela permet, ensuite en mesurant en continu la résistance électrique d'une mèche de carbone insérée dans la structure à contrôler, de calculer directement suivant les équations du modèle développé, la déformation subie pour chaque valeur de résistance électrique mesurée.

Cette méthode est cependant limitée par plusieurs sources d'erreurs possibles. D'une part une erreur intervient lors du passage de la résistance électrique mesurée par le capteur à la déformation calculée par les équations du modèle. Et d'autre part, il existe une erreur entre la résistance électrique donnée par la courbe de caractérisation de la mèche de carbone (utilisée pour le modèle de calcul) et celle du capteur intégré dans la structure à contrôler, pour la même déformation. Cette dernière erreur augmente avec les fortes déformations. En effet l'expérience montre que les courbes de résistance électrique en fonction de la déformation divergent pour les grandes déformations. En fait pour une mèche de carbone donnée, il faut définir une plage de déformation pour laquelle les écarts types obtenus sont acceptables. La même mèche de carbone ne pourra pas déterminer avec précision l'évolution de l'endommagement du matériau sur toute l'échelle de mesure. Pour pallier ce problème, il est cependant possible d'utiliser des mèches de carbone d'allongement à la rupture différent.

Information utilisée	Acquisition	Pièce sous charge	Type de mèche de carbone recommandé
Effet fusible	Continue/Ponctuelle	Oui/Non	All. à rupture faible
Résistance électrique résiduelle	Ponctuelle	Non	All. à rupture faible Nombre de filaments élevé
Elongation des fibres	Continue	Oui	All. à rupture élevé Nombre de filaments faible
Evolution des ruptures successives des fibres	Continue	Oui	All. à rupture faible

**Tableau 4-1 : Bilan des différents moyens de traiter la réponse des capteurs résistifs développés**

#### **4.1.4. Influence de la loi de chargement et de l'orientation du chargement sur la réponse électrique de la mèche de carbone**

Dans le paragraphe précédent, pour définir la réponse électrique du capteur, nous avons considéré que le matériau subissait une contrainte croissante monoaxiale dans la direction axiale de la mèche de carbone. Or sur une pièce complexe en service, le champ de contrainte n'est pas aussi simple : phénomènes de flexion, choc, fatigue, chargement aléatoire, contraintes bi-axiales. Par ailleurs, l'analyse expérimentale réalisée montre que les mèches de carbone sont sensibles à d'autres types de sollicitations telles que la flexion, le délaminage ou encore la fatigue et qu'elles réagissent à ces sollicitations avec des réponses différentes de celles obtenues en traction.

Dans le cas d'une sollicitation en flexion, la mèche de carbone étant insérée en peau d'éprouvette en zone tendue, les courbes résistance électrique/déformation n'ont pas la même allure que celles obtenues en traction. En effet lors de la traction dans la direction de l'axe de la mèche, les fibres cassées s'éloignent continuellement les unes des autres, alors que pour la flexion, les fibres rompues peuvent revenir en contact avec leur voisines sous l'effet de forces transverses (cf. § 3-2-1-1-3). Ce phénomène de remise en contact partielle entraîne une atténuation de l'augmentation de la résistance électrique. L'allure des courbes de flexion présente donc une première augmentation brutale de la résistance électrique qui correspond à la rupture des fibres les plus tendues de la mèche, ensuite la résistance électrique augmente moins rapidement.

Pour les essais de cisaillement en appuis rapprochés, lors du délaminage de l'éprouvette, il se produit une augmentation de la résistance électrique due à la décohésion des plis entre lesquels la mèche de carbone est insérée (cf. § 3-2-1-2). Cette augmentation de la résistance électrique est suivie d'une baisse ou d'un état stationnaire alors que la contrainte subie par la pièce continue à augmenter. Cela s'explique par une remise en contact des fibres de carbone entre elles encore plus marquée que pour de la flexion. Après la rupture des fibres, lorsque la contrainte appliquée augmente, les fibres rompues sont immédiatement remises en contact avec d'autres fibres.

Lors d'essais de fatigue à amplitude de contrainte imposée, la résistance électrique des mèches de carbone augmente après un certain nombre de cycles, si la contrainte utilisée est proche par valeur inférieure du seuil de rupture de la mèche de carbone déterminé en statique. Cette augmentation est due principalement à la fatigue du matériau hôte qui provoque une augmentation progressive de sa déformation maximale. Cependant un deuxième phénomène intervient, celui de la fatigue intrinsèque de la mèche de carbone. Ce phénomène est confirmé par les essais de fatigue à flèche imposée, pour lesquels sont notées des augmentations de la résistance électrique de la mèche de carbone, bien que la déformation maximale imposée reste constante. L'effet de la fatigue intrinsèque de la fibre reste cependant très secondaire, puisque lors des essais à amplitude de contrainte constante, l'augmentation de la résistance électrique des mèches de carbone intervient pratiquement pour les mêmes déformations que lors des essais de traction statique. Lors des essais de fatigue en flexion trois points à flèche imposée,

après une forte augmentation de résistance due à des ruptures de fibres, il apparaît dans certains cas, comme lors des essais de cisaillement, une baisse de résistance électrique correspondant à la remise en contact partielle des fibres cassées entre elles.

Comme les réponses des capteurs présentent des allures différentes suivant les types de sollicitations appliquées, il est possible, en analysant la courbe obtenue, de déterminer qualitativement quels types de sollicitations interviennent prioritairement au niveau de l'emplacement du capteur : traction, flexion ou délaminage.

En revanche, si une pièce est soumise à des sollicitations inconnues, l'augmentation de résistance électrique du capteur sera différente en fonction de la sollicitation. Par exemple, l'augmentation de résistance électrique sera plus importante, pour une même déformation de la mèche de carbone, lors d'une contrainte en traction (force exercée parallèlement à la mèche de carbone) que pour une contrainte de flexion (force exercée perpendiculairement à la mèche de carbone). Il sera donc impossible de déterminer un taux d'endommagement, si la pièce subit des sollicitations complexes inconnues.

Cependant, durant la phase de conception de la pièce composite, suivant sa géométrie et les charges appliquées sur celle-ci, le type et l'orientation des contraintes auxquelles sera soumise la pièce peuvent être déterminés. En fonction de ces informations, il convient de choisir l'emplacement, l'orientation et le nombre de mèches de carbone servant de capteurs d'endommagement, de façon à optimiser les informations fournies par ces capteurs. Par exemple placer des mèches de carbone en peau de pièce et non entre les plis centraux afin d'augmenter leur sensibilité aux phénomènes de flexion.

Néanmoins, les mèches de carbone utilisées comme capteurs ne donnent des informations qu'en fonction de leur propre endommagement. Si la structure à contrôler subit des endommagements très localisés (choc par exemple), il est impératif qu'un capteur soit positionné au voisinage de la zone atteinte pour générer une information. Il convient donc de choisir l'emplacement des mèches de carbone à utiliser dans les zones les plus vulnérables ou les plus exposées de la structure à contrôler.

Dans tous les cas, afin de pouvoir utiliser le capteur résistif, il faut pouvoir passer dans un premier temps de l'information électrique du capteur à une information mécanique, sa déformation. Cette étape se fait soit par comparaison avec les résultats des courbes de caractérisation des mèches de carbone, soit par la modélisation de ces courbes résistance électrique/déformation, sujet abordé dans le paragraphe suivant.



## 4.2. Modélisation de la réponse du capteur

La modélisation du comportement de la mèche de carbone a concrètement pour objectif de déterminer le traitement mathématique nécessaire pour relier l'augmentation de la résistance électrique de la mèche de carbone à sa déformation, ce qui permettrait de concevoir des programmes informatiques pouvant suivre en temps réel l'évolution de l'endommagement dans le matériau instrumenté. On se limitera dans cette partie à une sollicitation monoaxiale en traction parallèlement à la mèche de carbone.

### 4.2.1. Modélisation de l'augmentation de résistance électrique due à l'élongation des fibres de carbone

La relation existant entre l'augmentation de la résistance électrique et la déformation de la mèche de carbone est théoriquement linéaire (cf. § 3-1-3-1) et il est possible de retrouver la déformation subie par le matériau à partir de l'augmentation de la résistance électrique du capteur suivant l'équation rappelée ci-dessous :

$$\varepsilon = \frac{\Delta R_e}{R_0 (1 + 2\nu)} \quad (4-1)$$

avec  $\Delta R_e$  : variation de la résistance électrique due à l'élongation des fibres  
 $\varepsilon$  : déformation du matériau  
 $R_0$  : résistance électrique initiale effective de la mèche de carbone.  
 $\nu$  : coefficient de Poisson (pour les fibres de carbone  $\nu = 0,32$  [54])

Il suffit pour cela de connaître la résistance électrique initiale effective de la mèche de carbone et de se trouver avant les premières ruptures des fibres de carbone. La résistance électrique initiale effective de la mèche correspond à la résistance de la partie de mèche qui subie l'élongation durant l'essai. La longueur de mèche insérée dans les talons, ainsi que les parties de mèche en sortie de l'éprouvette permettant la connexion avec le circuit extérieur ne sont donc pas prises en compte.

Nous avons étudié deux types de mèches de carbone : des mèches d'allongement à la rupture 0,6 % et des mèches d'allongement à la rupture 1,5/1,7 % comportant toutes deux 3 000 filaments. Ces deux types de mèches sont choisis car leur résistance électrique initiale est importante, en raison du nombre relativement faible de filaments de carbone contenus dans la mèche. L'augmentation de la résistance électrique due à l'élongation pour ces deux mèches est par conséquent d'amplitude plus élevée que pour les autres mèches de carbone. Pour des mèches d'allongement à la rupture 0,6 %, les déformations expérimentales (moyenne sur trois éprouvettes) et les déformations calculées par l'équation 4-1 sont comparées dans le tableau 4-2. Une erreur moyenne de 10,9 % entre les valeurs de déformations expérimentales et les déformations calculées est obtenue sur une plage de 0 à 0,5 % de déformation. Ensuite l'erreur diverge car l'on se rapproche de la zone de rupture des fibres. La déformation calculée

moyenne est toujours supérieure à la déformation réelle avec une erreur pratiquement constante, ce qui peut être expliqué par une imprécision sur le coefficient de Poisson. L'erreur entre les droites calculées et les courbes expérimentales peut provenir aussi de l'effet des quelques fibres cassées lors de l'insertion des mèches de carbone dans les éprouvettes.

Déformation expérimentale $\varepsilon$ (%)	Déformation calculée : $\varepsilon_{\text{cal}} = \frac{\Delta R_e}{R_0 (1 + 2 \nu)}$		
	$\varepsilon_{\text{cal moy.}}$	Coef. de correction (moyenne sur 3 éprouvettes)	Erreur (moyenne sur 3 éprouvettes)
0,1	0,106	0,125	13,8 %
0,2	0,219	0,087	9,5 %
0,3	0,328	0,085	9,3 %
0,4	0,446	0,103	11,5 %
0,5	0,552	0,094	10,4 %
0,6	0,759	0,209	20,9 %

**Tableau 4-2 : Calcul de la déformation à partir de la résistance électrique due à l'élongation pour des fibres de 0,6 % d'allongement à la rupture**

$$\text{avec Coef. de correction} = \left| \frac{\varepsilon_{\text{cal}} - \varepsilon}{\varepsilon_{\text{cal}}} \right| \quad \text{Erreur} = \left| \frac{\varepsilon_{\text{cal}} - \varepsilon}{\varepsilon} \right|$$

Pour diminuer l'erreur sur les déformations calculées, il est possible de prendre en compte un coefficient de correction. Celui-ci ne varie que faiblement en fonction de la déformation appliquée. Il est possible d'utiliser le coefficient de correction moyen (moyenne pour les déformations inférieures à 0,6 %). Pour chaque mèche de carbone utilisée, la déformation peut être recalculée en prenant en compte le coefficient de correction moyen :

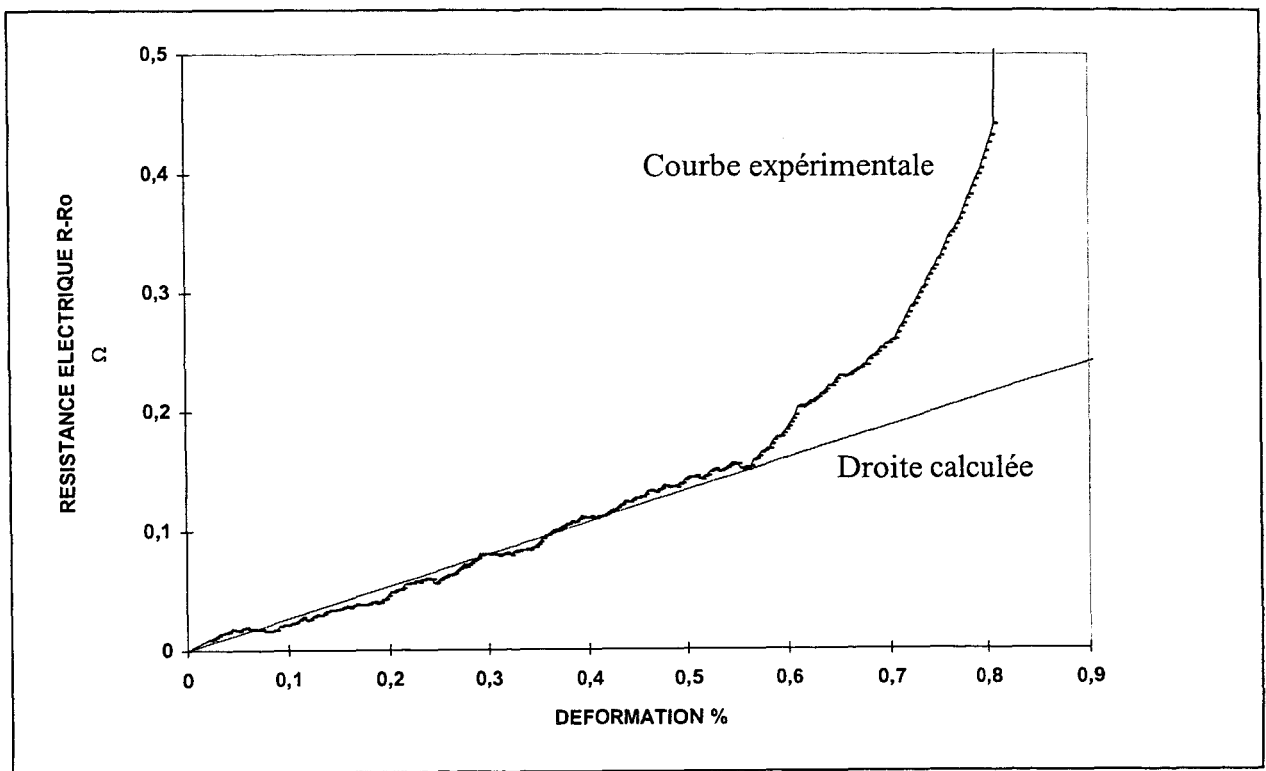
$$\varepsilon_{\text{cal}}' = \varepsilon_{\text{cal}} (1 - \text{coeff. de correction}_{\text{moy}})$$

avec coeff. de correction<sub>moy</sub> = 0,1

Le tableau 4-3 présente les erreurs obtenues sur les déformations calculées pour chacune des trois éprouvettes utilisées en prenant en compte le coefficient de correction. Sur une plage de déformation entre 0,2 % et 0,5 %, les erreurs obtenues sont inférieures à 5 %. Il est donc possible de retrouver la déformation de l'éprouvette à partir de son augmentation de résistance électrique provoquée par l'élongation des fibres de carbone. Cependant cette méthode est utilisable seulement pour un intervalle réduit de déformation à cause de l'allongement à la rupture faible de la mèche de carbone utilisée (0,6 %). La droite calculée et la courbe expérimentale commencent à diverger pour 0,6 % de déformation, ce qui correspond à la valeur à la rupture des fibres de carbone donnée par le fournisseur (cf. fig. 4-2).

Déformation : $\varepsilon$	Erreur = $\frac{\varepsilon_{cal} - \varepsilon}{\varepsilon}$		
	Eprouvette n°1	Eprouvette n°2	Eprouvette n°3
0,1	2,9 %	19,8 %	8,9 %
0,2	2,9 %	4,73 %	4,5 %
0,3	3 %	2,7 %	0,9 %
0,4	1,8 %	0,2 %	3,6 %
0,5	4,0 %	3,3 %	4,8 %
0,6	18,7 %	4,7 %	18,8 %

**Tableau 4-3 : Erreurs sur les déformations calculées avec le coefficient de correction pour des fibres de 0,6 % d'allongement à la rupture**



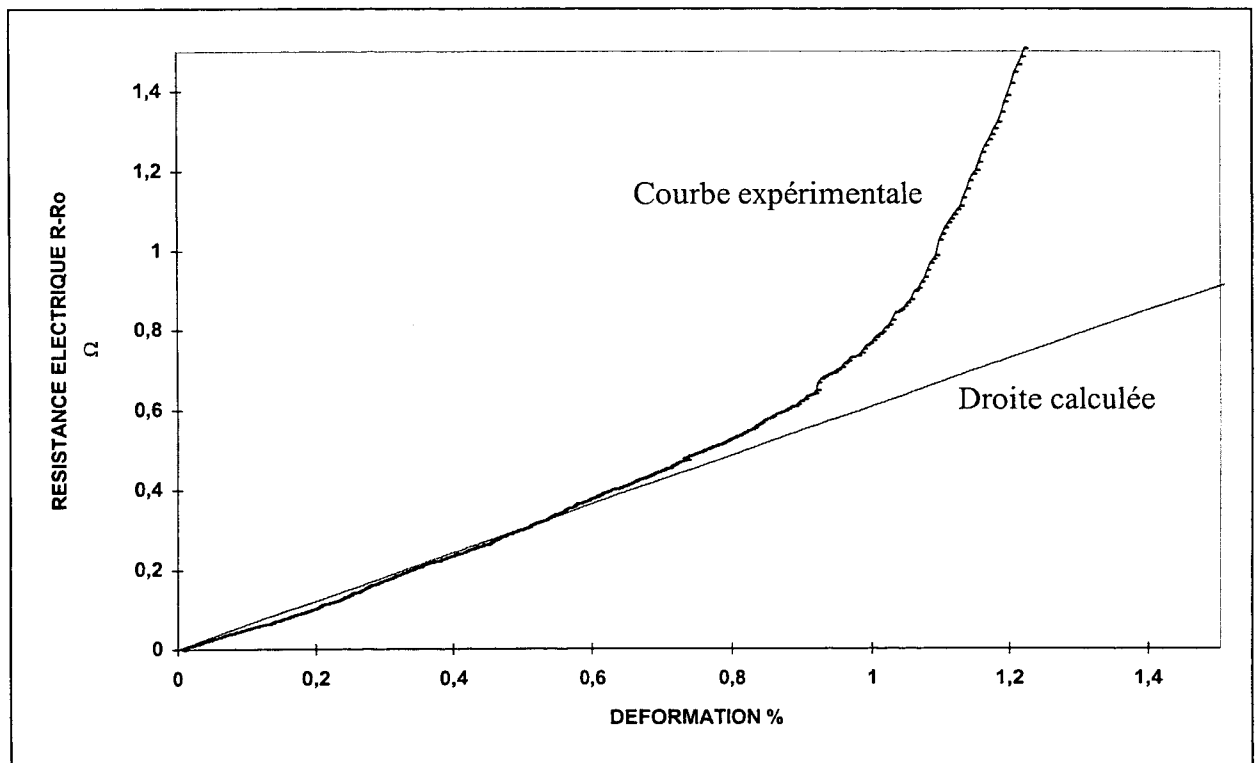
**Fig. 4-2 : Comparaison entre la droite calculée (en tenant compte du coefficient de correction) et la courbe expérimentale pour une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 0,6 % et de nombre de filaments 3 K (ép. n°3)**

Le même type de calcul est effectué pour trois fibres d'allongement à la rupture 1,5/1,7 %, 3 K. Si la formule est appliquée directement sans coefficient de correction, l'erreur entre la déformation réelle et la déformation calculée est plus importante que pour les mèches de carbone précédentes (erreur moy. = 32,5 %). L'erreur dépend donc du type de fibres utilisées car leur coefficient de Poisson doit être sensiblement différent. Néanmoins en utilisant la même méthode que précédemment, il est possible de trouver un coefficient de correction sensiblement constant selon la déformation appliquée (dans l'intervalle 0,1 % à 0,7 %). Les erreurs trouvées entre la déformation calculée en intégrant le coefficient de correction et les valeurs de déformation expérimentales sont présentées dans le tableau 4-4. La

plage de déformation pour laquelle les erreurs sont inférieures à 10 % est comprise entre 0,2 % et 0,7 %. Le domaine d'utilisation de ce capteur est donc plus important que la mèche précédente mais les erreurs commises sont un peu plus élevées.

Déformation expérimentale : $\varepsilon$	Erreur = $\left  \frac{\varepsilon_{\text{cal}} - \varepsilon}{\varepsilon} \right $		
	Eprouvette N°1	Eprouvette N°2	Eprouvette N°3
0,1	7,4 %	14,0 %	18,1 %
0,2	9,3 %	3,2 %	9,3 %
0,3	5,8 %	0,3 %	4,8 %
0,4	4,8 %	0,8 %	2,8 %
0,5	2,5 %	4,8 %	0,7 %
0,6	5,2 %	9,1 %	3,7 %
0,7	9,1 %	9,8 %	5,2 %
0,8	22,4 %	24,4 %	8,9 %

**Tableau 4-4 : Erreurs sur les déformations calculées pour des fibres de 0,6 % d'allongement à la rupture**



**Fig. 4-3 : Comparaison entre la droite calculée et la courbe expérimentale pour une mèche de carbone d'allongement à la rupture de 1,5/1,7 % et de nombre de filaments 3 K (ép. n°3)**

## 4.2.2. Modélisation de l'augmentation de résistance électrique due à la rupture des fibres de carbone

### 4.2.2.1. Modélisation de la rupture des fibres de carbone

Il est bien établi que la résistance mécanique qui caractérise une fibre de carbone, est liée à la probabilité de présence de défauts ainsi qu'à leur sévérité. Les défauts rencontrés le long d'une fibre de carbone sont de plusieurs types [56]:

- défauts structuraux (dislocation de la structure cristalline locale)
- porosités internes
- défauts de surface (inclusions, étranglements, porosités ouvertes)

L'allongement à la rupture de la fibre de carbone est directement déterminé par la présence de ces défauts au long de la fibre.

#### 4.2.2.1.1. Théorie du maillon le plus faible

Cette théorie est souvent utilisée pour analyser la rupture de matériaux fragiles. La rupture d'un monofilament a lieu au niveau le plus faible de la fibre correspondant au défaut le plus critique. La probabilité de rupture du monofilament correspond donc à la probabilité de rupture du maillon le plus faible. La probabilité de rupture est alors donnée pour une fibre de longueur  $L$  par :

$$\Pr(\sigma_r < \sigma) = 1 - e^{-\theta(\sigma)L} \quad (4-2)$$

Avec  $\sigma_r$  la contrainte de fracture,  $\sigma$  la contrainte imposée et  $\theta(\sigma)$  une fonction analytique empirique dont la plus utilisée pour décrire la rupture des fibres de carbone est la fonction de Weibull.

#### 4.2.2.1.2. Modélisation d'essai de traction sur monofilament

Pour les essais de traction sur monofilament, la fibre est tendue horizontalement entre deux pinces. Les extrémités de la fibre de carbone sont collées sur des supports en papier pour permettre d'agripper la fibre sans la casser. L'une des pinces est montée sur un bras mobile permettant l'application de la contrainte. L'autre pince est montée sur un support sur lequel est placée une jauge de déformation et qui est relié à une cellule de force. C. Baxevanakis [57] a modélisé la population de défauts, estimée lors d'essais de traction sur monofilament provenant de mèches de carbone Torayca M 40, en utilisant une fonction de Weibull à 3 paramètres :

$$\theta(\sigma) = \left( \frac{\sigma - \sigma_s}{\sigma_0} \right)^m \quad (4-3)$$

avec  $\sigma_0$  : paramètre d'échelle,  $\sigma_s$  : minimum de localisation (contrainte seuil pour laquelle la probabilité de rupture de fibre est encore nulle) et  $m$  : paramètre de forme

Les coefficients  $m$  et  $\sigma_0$  sont calculés en utilisant la méthode des moindres carrés qui consiste à minimiser la fonction erreur  $E$ .

$$E = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{y_i - t_i}{N} \right]^2 \tag{4-4}$$

avec  $N$  le nombre de points expérimentaux,  $y_i$  les valeurs expérimentales et  $t_i$  les valeurs théoriques.

Les valeurs trouvées sont données dans le tableau suivant :

$m$	$\sigma_0$ (GPa)
3,51	3,28

**Tableau 4-5 : Valeurs des paramètres du modèle pour une distribution de Weibull [57]**

**4.2.2.1.3. Modélisation d'essais de traction sur fibre imprégnée (test de multifragmentation)**

L'essai sur mèche imprégnée consiste à utiliser des éprouvettes constituées d'un seul monofilament de carbone noyé dans une matrice ductile. Cet essai beaucoup plus facile à mettre en oeuvre que l'essai sur monofilament non imprégné, est généralement utilisé pour la détermination de l'élongation à la rupture des fibres de carbone. La présence de la matrice permet un rechargement de la fibre via les contraintes de cisaillement interfaciales après une première rupture. Au-delà d'une certaine longueur à partir de la rupture, le filament assure de nouveau son rôle de renfort. La rupture de l'éprouvette se produira donc au bout de ruptures successives du monofilament, jusqu'à ce que la longueur moyenne des fragments corresponde à la longueur critique propre du système fibre/matrice pour laquelle le filament ne peut plus assurer son rôle de renfort. C. Baxevanakis [57] a effectué des essais de traction sur fibre imprégnée (Torayca M40) qu'il a modélisé par une fonction sigmoïdale :

$$\theta(\sigma) = A \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\sigma - \sigma_s}{\sigma_0} \right)^m \right] \right\} \tag{4-5}$$

où  $A$  est un coefficient empirique

En utilisant la méthode des moindres carrés, C. Baxevanakis a déterminé les coefficients  $m$ ,  $\sigma_0$ , et  $A$  qui sont reportés dans le tableau suivant.

$m$	$\sigma_0$ (GPa)	$A$
3,94	6,688	345

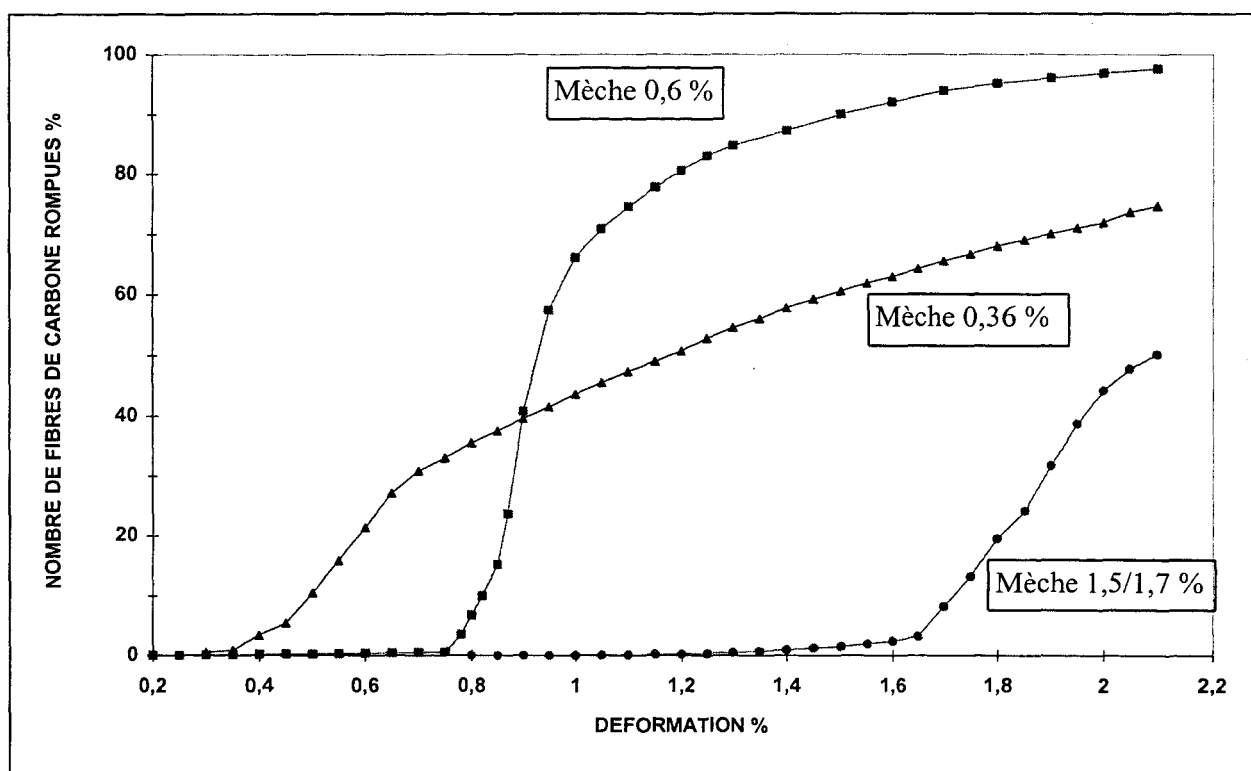
**Tableau 4-6 : Valeurs des paramètres du modèle pour une distribution sigmoïdale [57]**

#### 4.2.2.2. Relation entre le nombre de fibres de carbone rompues et la résistance électrique : problème de la conductibilité transverse

En première approximation les mèches de carbone servant de capteur d'endommagement peuvent être considérées comme un arrangement de toutes les fibres de carbone en parallèle isolées électriquement. Le nombre de fibres de carbone rompues est alors donné par la relation suivante :

$$n = \frac{\Delta R N}{R_0 + \Delta R} \quad (3-7)$$

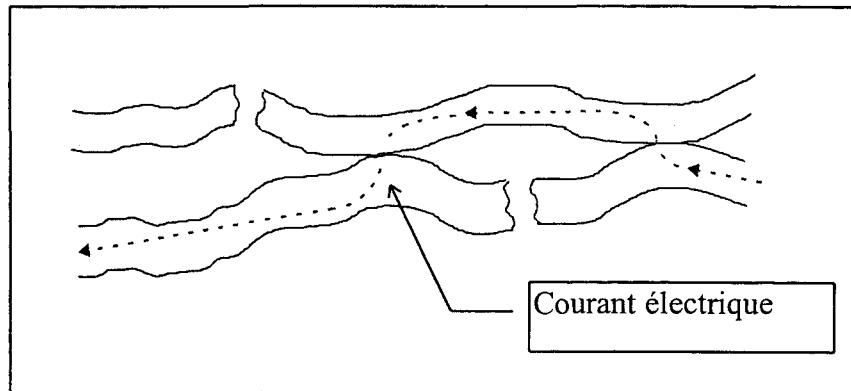
avec  $\Delta R$  : augmentation de résistance électrique ( $R - R_0$ )  
 $R_0$  : résistance électrique initiale  
 $N$  : nombre total de fibres



**Fig. 4-4 : Pourcentage calculé du nombre de fibres de carbone cassées en fonction de la déformation**

Les courbes du pourcentage de fibre de carbone cassées calculées à partir de l'augmentation expérimentale de la résistance électrique par cette relation sont présentées sur la figure 4-4 (moyenne sur cinq mèches de carbone dans chaque cas). Pour les mèches d'allongement à la rupture 0,36 % et 1,5/1,7 % même pour les fortes déformations, le nombre de fibres de carbone rompues reste largement inférieur à 100 %. Il semble impossible que pour des fibres d'allongement à la rupture nominale de 0,36 %, toutes les fibres d'une mèche ne soit pas cassées pour une déformation supérieure à 2 %. Le modèle utilisé a donc tendance

à minimiser le nombre de fibres de carbone rompues, surtout pour les fibres d'allongement à la rupture 0,36 % et 1,5/1,7 %, alors que cet effet est moins important pour les mèches d'allongement à la rupture 0,6 %. La sous estimation du nombre de fibres de carbone cassées peut provenir de phénomènes de conduction transverse qui ne sont pas pris en compte dans le modèle présenté et qui permettent à des fibres cassées de participer quand même à la conduction du courant électrique (cf. fig. 4-5). Cette hypothèse est confortée par l'existence d'une telle conductibilité transverse à l'intérieur de composites à renfort carbone unidirectionnel (cf. § 1-4-3-1).



**Fig. 4-5 : Illustration de l'effet de la conductivité transverse : deux fibres de carbonées sont rompues alors qu'un seul chemin conducteur est coupé**

Des observations microscopiques sont réalisées afin de démontrer l'existence d'une conductivité transverse et d'expliquer la raison de l'effet plus ou moins important de celle-ci d'un type de mèche de carbone à l'autre (notamment pour les mèches d'allongements à la rupture voisins 0,6 % et 0,36 %). Des photographies de coupes perpendiculaires à l'axe des mèches de carbone sont prises au microscope optique. Sur ces clichés, apparaissent clairement les contacts transverse entre les différentes fibres de carbone (cf. fig. 4-6). On remarque aussi la différence des états de surface entre les deux types de mèche en examinant le contour des fibres. L'état de la surface des fibres 0,36 % est lisse alors que celui des fibres 0,6 % est beaucoup plus accidenté. Les contacts électriques transverse sont donc plus intimes pour les fibres 0,36 %, ce qui peut expliquer l'effet plus important de la conductivité transverse pour cette mèche de carbone.

D'autre part, nous avons examiné le faciès de rupture des mèches après essais de traction. Les fissurations des mèches d'allongement à la rupture 0,6 % se propagent toujours sur toute la largeur de la mèche de façon pratiquement linéaire (cf. fig. 4-7 a) alors que les fissures des mèches d'allongement 0,36 % restent plus localisées (cf. fig 4-7 b) ou se propagent de façon très chaotique (en formant un front de rupture accidenté). Le comportement à la rupture de la mèche d'allongement à la rupture 0,36 % par rapport à celui des mèches 0,6 % favorise donc les contacts transverse entre les fibres rompues.



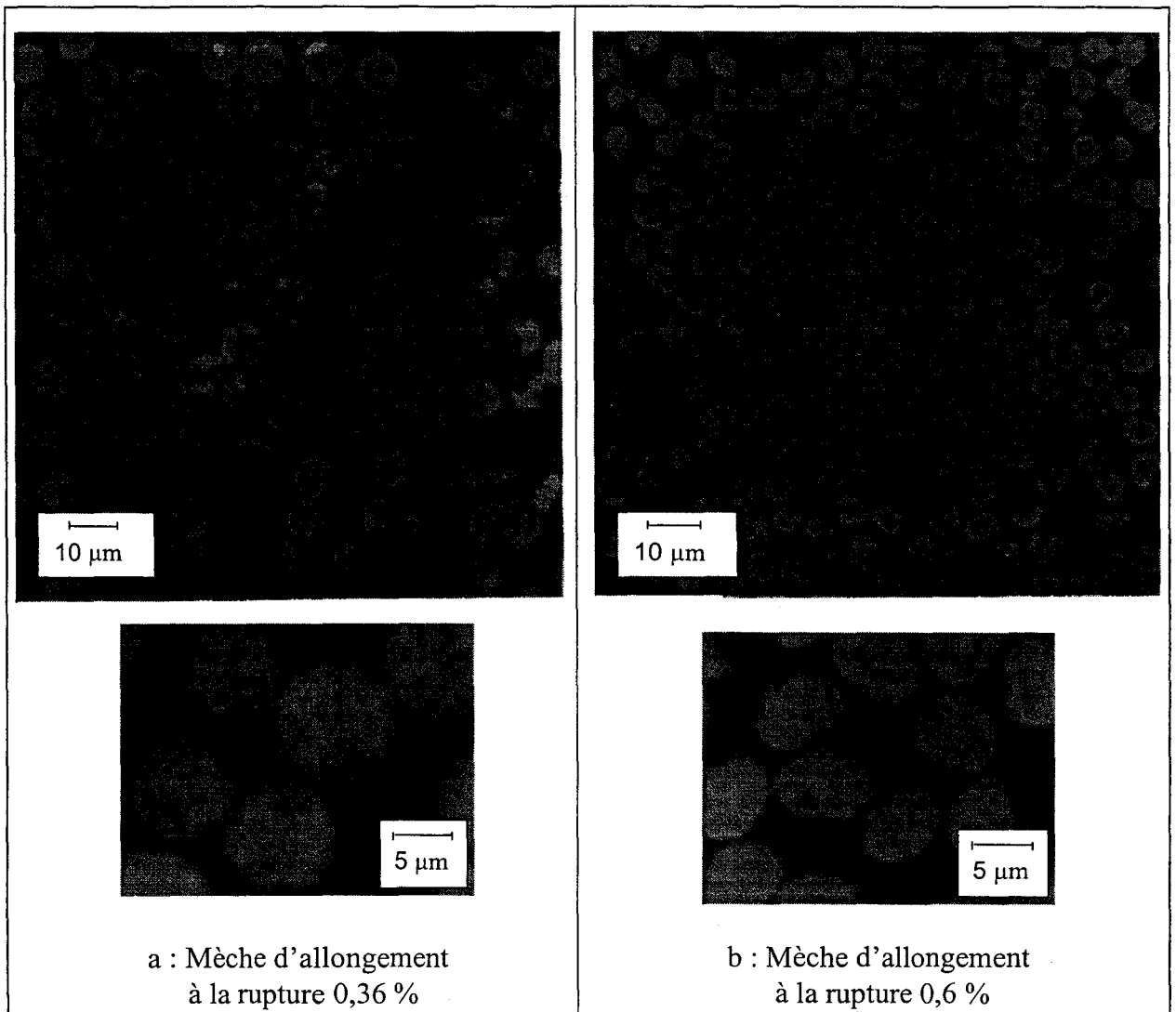


Fig. 4-6 : Mise en évidence de contacts interfibre

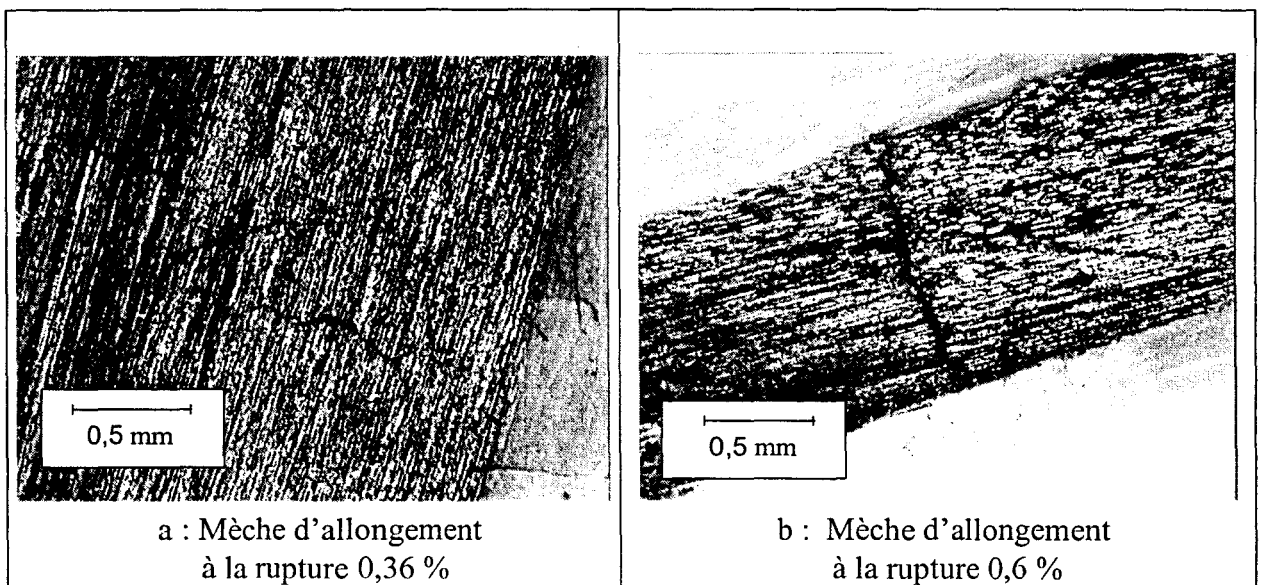


Fig. 4-7 : Différence de faciès de rupture entre les fibres 0,36 % et 0,6 % d'allongement à la rupture

Pour la modélisation des courbes résistance électrique/déformation, nous utilisons les fibres d'allongement à la rupture 0,6 %, qui sont les moins sensibles aux effets de la résistance électrique transverse.

### 4.2.2.3. Application des modèles pour le calcul des courbes résistance électrique/déformation

Notre objectif est de pouvoir modéliser la loi de comportement de l'augmentation de la résistance électrique en fonction de la déformation. En effet d'un point de vue pratique, le capteur développé, donnera une augmentation de résistance électrique qu'il faudra être en mesure d'associer à la déformation de la mèche de carbone. Les modèles présentés précédemment donnent des fonctions de distribution  $\theta$  en fonction des contraintes. Pour notre application, il convient de déterminer les fonctions de distribution en fonction des déformations :

Pour la fonction de Weibull

$$\theta(\varepsilon) = \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_s}{\varepsilon_0} \right)^m \quad (4-6)$$

Pour la fonction sigmoïdale

$$\theta(\varepsilon) = A \left\{ 1 - \exp \left[ - \left( \frac{\varepsilon - \varepsilon_s}{\varepsilon_0} \right)^m \right] \right\} \quad (4-7)$$

$\varepsilon_0$  : paramètre d'échelle

$\varepsilon_s$  : minimum de localisation (déformation seuil pour laquelle la probabilité de rupture des fibres est encore nulle)

$m$  : paramètre de forme

Les fibres de carbone utilisées sont de mêmes types que celles utilisées par C. Baxevanakis (fibre Torayca M40), ce qui nous permet de conserver le même paramètre de forme  $m$ . En revanche, il sera nécessaire de recalculer par la méthode des moindres carrés le paramètre d'échelle  $\varepsilon_0$  et le paramètre  $A$ .

#### 4.2.2.3.1. Distribution de Weibull

Pour pouvoir utiliser ce modèle plusieurs hypothèses doivent être faites :

- Hypothèse 1 :

L'influence de la matrice et du matériau hôte sur la rupture des fibres est négligée. Des essais de traction effectués avec différents types de renfort ne montrent aucune différence

entre les courbes résistance électrique/déformation obtenues, ce qui semble justifier cette hypothèse. Cependant, pour des tests sur monofilament seul, une seule rupture est prise en compte pour une fibre donnée, alors que dans le cas de filaments pris dans une matrice ductile, plusieurs ruptures peuvent se produire sur la même fibre. La distribution de Weibull étant utilisée initialement pour modéliser des essais sur monofilament, une seule rupture par fibre est par conséquent prise en compte.

La présence d'une matrice peut aussi entraîner, lors d'une rupture un transfert de charges par cisaillement aux fibres voisines. La probabilité de rupture des fibres voisines au niveau de la section de la mèche où a eu lieu la fracture est alors fortement augmentée [58]. Cet effet n'est pas non plus pris en compte.

- Hypothèse 2 :

La mèche de carbone est considérée d'un point de vue électrique comme un arrangement en parallèle de toutes les fibres. Pour pouvoir exprimer facilement le nombre de fibres rompues en fonction de la résistance électrique, les contacts électriques transverses entre les différentes fibres ne sont pas pris en compte. On se place dans le cas idéal où chaque filament est isolé électriquement de ses voisins par une couche de résine totalement isolante.

- Hypothèse 3 :

La déformation de la mèche de carbone est prise égale à la déformation de l'éprouvette utilisée (les effets de tension initiale des différentes fibres de carbone sont négligés).

L'objectif est de calculer à partir d'un écart de résistance électrique la déformation subie par le matériau.

A partir de l'augmentation de résistance  $\Delta R$ , il est possible de calculer le nombre de fibres de carbone rompues ( $n$ ).

$$n = \frac{\Delta R N}{R_0 + \Delta R} \quad (3-7)$$

avec  $\Delta R$  : augmentation de résistance électrique  $R - R_0$   
 $R_0$  : résistance électrique initiale  
 $N$  : nombre total de fibres

La probabilité de rupture des fibres est donnée par :

$$P(\varepsilon_r < \varepsilon) = \frac{n}{N} = \frac{\Delta R}{R_0 + \Delta R} \quad (4-8)$$

$\varepsilon_r$  : déformation à la rupture  
 $n$  : nombre de fibres rompues pour la déformation  $\varepsilon$

L'équation (4-2) appliquée à la déformation donne :

$$\theta(\varepsilon) = -\frac{\ln(1 - P(\varepsilon_r < \varepsilon))}{L} = -\frac{\ln \left[ 1 - \left( \frac{\Delta R}{R_0 + \Delta R} \right) \right]}{L} \quad (4-9)$$

L'équation (4-6) se réécrit :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (\theta(\varepsilon))^{1/m} + \varepsilon_s = \varepsilon_0 \left[ -\frac{\ln \left[ 1 - \left( \frac{\Delta R}{R_0 + \Delta R} \right) \right]}{L} \right]^{1/m} + \varepsilon_s \quad (4-10)$$

La valeur  $\varepsilon_s$  est donnée par la déformation correspondant aux premières ruptures de fibres de la mèche de carbone. Celle-ci est déterminée expérimentalement à partir de l'amplitude des signaux d'émission acoustique, en considérant que la rupture des fibres de carbone donne des signaux d'amplitude supérieure à 95 dB, alors que les signaux d'amplitude inférieure proviennent de la fissuration de la matrice (cf. § 2-2-2-1). Le coefficient  $\varepsilon_0$  est recalculé suivant la méthode des moindres carrés (cf. annexe II).

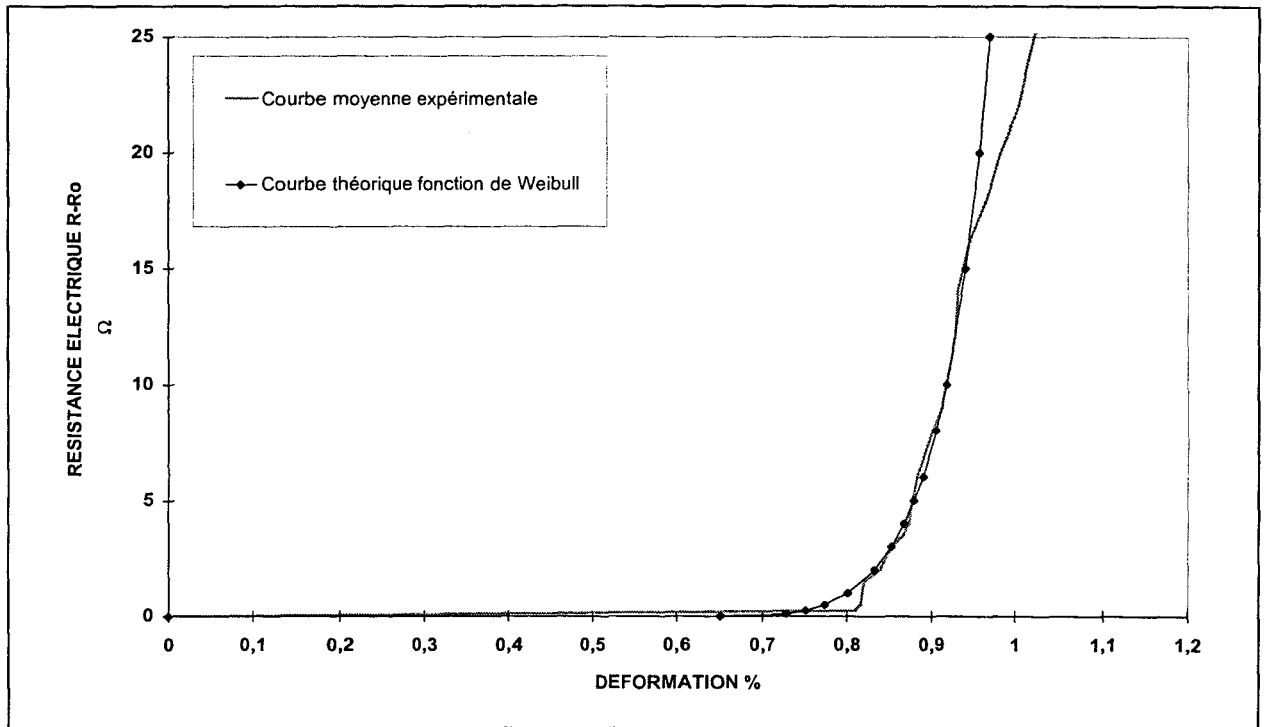
Le tableau suivant donne les valeurs injectées dans le modèle pour le calcul de la courbe théorique. La courbe théorique est ensuite comparée avec la courbe moyenne expérimentale obtenue sur cinq éprouvettes (cf. fig. 4-8).

$R_{o\text{ moy}} (\Omega)$	L (m)	$\varepsilon_s$ (%)	m	$\varepsilon_0$ (%)
12,287	0,16	0,65	3,51	0,185

**Tableau 4-7 : Valeurs retenues pour le modèle avec une distribution de Weibull**

La comparaison des courbes théoriques et expérimentales montre qu'il y a une bonne corrélation entre les deux courbes pour une augmentation de résistance électrique comprise entre 1  $\Omega$  et 17  $\Omega$  (correspondant à des déformations comprises entre 0,82 % et 0,97 %). Pour les augmentations de résistance électrique supérieures, la courbe théorique augmente plus rapidement que la courbe expérimentale car dans le modèle théorique, les filaments de carbone cassent une seule fois, donc chaque rupture de fibre entraîne une augmentation de la résistance électrique. En fait, la même fibre de carbone peut être rompue plusieurs fois, ce qui n'entraîne pas de variation de résistance électrique significative. La probabilité de rupture multiple est d'autant plus importante que le nombre de fibres cassées est grand, ce qui peut expliquer les divergences entre les deux courbes pour les déformations importantes. Le début de la courbe est bien approximé par une distribution de Weibull, développée pour des essais ne prenant pas en compte les fractures multiples sur la même fibre, car au début de l'essai la probabilité pour que deux fractures aient lieu sur une même fibre est très faible. Cette probabilité est aussi diminuée par l'effet de transfert de charge entre fibres adjacentes qui favorise la rupture de fibres distinctes plutôt que des ruptures sur la même fibre.

Un écart entre les deux courbes est aussi noté pour les valeurs très faibles d'augmentation de résistance électrique (inférieur à  $1 \Omega$ ). L'augmentation de la résistance électrique expérimentale initiale se fait pour une déformation plus importante que celle donnée par la courbe théorique, mais une fois l'augmentation de résistance électrique amorcée, celle-ci se fait avec une pente plus forte que celle donnée par la courbe théorique. Cela pourrait s'expliquer par la présence d'une résistance électrique transverse. Les toutes premières ruptures de fibre seraient alors minimisées d'un point de vue électrique à cause des contacts transverses interfibrés.



**Fig. 4-8 : Comparaison entre les courbes résistance électrique/déformation expérimentales et théoriques**

#### 4.2.2.3.2. Distribution sigmoïdale

Les hypothèses 2 et 3, utilisées pour la distribution de Weibull, sont conservées.

Ce nouveau modèle prend en compte les ruptures multiples pour une même fibre. Il paraît donc mieux adapté d'un point de vue mécanique. En effet, C. Baxevanakis [56] montre expérimentalement qu'il y a jusqu'à 2500 ruptures par mètres pour une fibre M40, lors de la rupture finale d'une éprouvette de multifragmentation. Pour ce modèle la probabilité de rupture est donnée en fonction du nombre de ruptures et non plus en fonction du nombre de fibres de carbone cassées (il peut avoir plusieurs ruptures pour une fibre donnée). Le nombre de ruptures ne peut pas être déterminé simplement à partir de l'augmentation de la résistance électrique. Cependant en considérant que le nombre de ruptures possibles ( $a$ ) est identique pour chaque fibre de carbone et que les ruptures interviennent préférentiellement sur la même fibre, nous retrouvons la même expression de la probabilité que précédemment comme le montre l'équation (4-11).

$$P(\varepsilon_r < \varepsilon) = \frac{n_r}{N_{rt}} = \frac{a \cdot n}{a \cdot N} = \frac{n}{N} \quad (4-11)$$

avec  $n_r$  : nombre de ruptures  
 $N_{rt}$  : nombre total de ruptures possibles  
 $a$  : nombre de ruptures par fibre

Comme précédemment on obtient :

$$\theta(\varepsilon) = -\frac{\ln(1 - P(\varepsilon_r < \varepsilon))}{L} = -\frac{\ln\left[1 - \left(\frac{\Delta R}{R_0 + \Delta R}\right)\right]}{L} \quad (4-9)$$

L'équation (4-7) se réécrit :

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \left[ -\ln\left(1 - \frac{\theta(\varepsilon)}{A}\right) \right]^{\frac{1}{m}} + \varepsilon_s = \varepsilon_0 \left[ -\ln\left[1 - \frac{\ln\left[1 - \left(\frac{\Delta R}{R_0 + \Delta R}\right)\right]}{LA}\right] \right]^{\frac{1}{m}} + \varepsilon_s \quad (4-12)$$

En prenant les valeurs données dans le tableau 4-8, on trouve une bonne corrélation avec les résultats expérimentaux pour des résistances électriques supérieures à 20 Ω (correspondant à des déformations supérieures à 0,95 %).

Ro moy (Ω)	L (m)	ε <sub>s</sub> (%)	m	ε <sub>0</sub> (%)	A
12,287	0,16	0,65	3,94	6,088	34,5

**Tableau 4-8 : Valeurs retenues pour le modèle avec une distribution sigmoïdale**

La figure 4-9 permet de constater qu'au moment où la fonction de Weibull diverge par rapport à la courbe expérimentale, la fonction sigmoïdale qui pour des déformations inférieures ne correspond pas avec la courbe expérimentale donne ensuite une bonne approximation de la courbe expérimentale. Le changement de modèle intervient pour une augmentation de résistance de 16 Ω qui correspond d'après l'équation (4-8) à une rupture de 56 % des fibres de carbone. A ce niveau de l'essai, la probabilité d'avoir une rupture sur une fibre déjà cassée une fois devient supérieure à la probabilité d'avoir une rupture sur une fibre de carbone intacte. La fonction de Weibull peut donc être associée à une loi de comportement résistance électrique/déformation où chaque fibre de carbone est cassée une seule fois et la fonction sigmoïdale peut être associée à une loi de comportement tenant compte des fractures multiples pour une même fibre de carbone, qui entraîne une augmentation moins rapide de la résistance électrique. Les fractures multiples des fibres de carbone sont confirmées par l'observation visuelle de mèches de carbone après essais de traction qui présentent en moyenne six ruptures majeures régulièrement espacées s'étendant sur toute la largeur de la mèche de carbone.

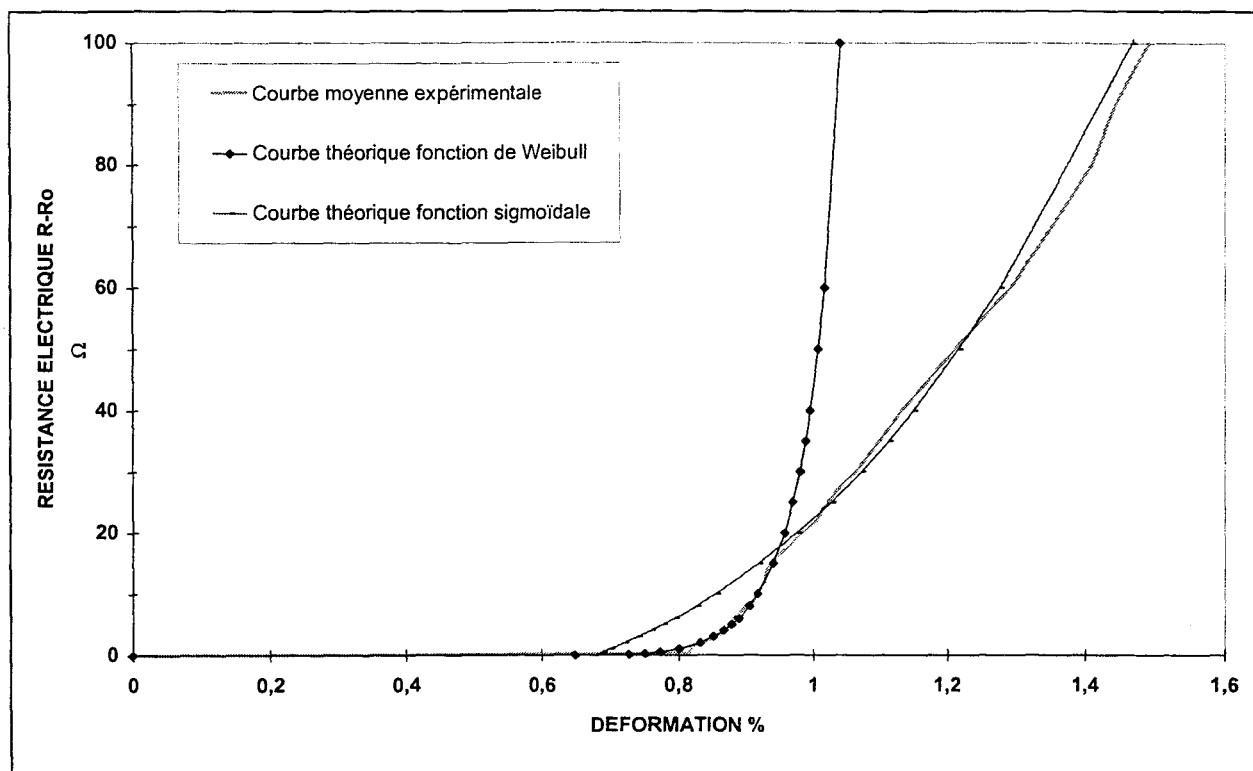


Fig. 4-9 : Approximation de la courbe expérimentale avec une fonction sigmoïdale

#### 4.2.2.4. Conclusion : application de la modélisation

Les courbes modèles calculées fournissent une bonne approximation de la courbe expérimentale jusqu'à une déformation de 1,5 %. D'un point de vue pratique les équations permettent de développer un code de calcul servant à déterminer, en temps réel et en continu, la déformation subie par la mèche de carbone intégrée à partir de la mesure de sa résistance électrique. En comparant cette déformation calculée, aux déformations préalablement établies correspondant aux endommagements critiques du matériau, il est ainsi possible d'obtenir le niveau d'endommagement du matériau (quantifié par sa chute de module par exemple). Dans le cas présenté, il faut que la sollicitation exercée soit monoaxiale et dans la direction de la mèche de carbone. Par ailleurs, la mesure de la résistance électrique doit s'effectuer en continu car c'est la résistance électrique du matériau sous sollicitation qui est utilisée ici.

La modélisation de la loi de comportement résistance électrique/déformation est un maillon essentiel dans la procédure de détection de l'endommagement car elle permet de passer par le calcul, de l'information électrique du capteur à la déformation du matériau hôte. Cependant pour les applications sur pièces industrielles, il convient de développer des modèles spécifiques adaptés aux lois de comportement des pièces étudiées. Ce travail est réalisé dans le paragraphe suivant pour appliquer les modèles développés à des tubes composites sollicités en pression interne. Pour cela, il convient auparavant d'effectuer une étude approfondie des lois de comportement mécaniques des tubes et des réponses électriques des capteurs d'endommagement associés aux tubes.

### 4.3. Validation des capteurs sur pièces industrielles

Il s'agit maintenant d'appliquer les capteurs d'endommagement développés, au contrôle de pièces industrielles, les essais sur éprouvettes ayant permis de déterminer et d'analyser les réponses électriques des différentes mèches de carbone utilisées. Deux types de structures industrielles sont retenues pour cette validation l'une simple (de révolution) et l'autre complexe :

- des tubes soumis à une pression interne, i.e. à des contraintes biaxiales, selon différentes lois de chargement (croissante, répétée à amplitude croissante, répété à amplitude constante).
- des sièges soumis à une sollicitation combinée de fatigue et de fluage.

Dans un premier temps les mèches de carbone sont montées en surface des tubes et des sièges, et noyées dans de la résine époxy de manière à vérifier la faisabilité du suivi d'endommagement et la fiabilité des capteurs. Cependant, l'objectif final est d'intégrer les mèches de carbone au sein de la structure composite.

#### 4.3.1. Tubes sous pression interne

##### 4.3.1.1. Lois de comportement des tubes sous pression interne

La détermination de l'emplacement et des caractéristiques des mèches de carbone faisant office de capteurs d'endommagement est réalisée sur la base des résultats préliminaires obtenus lors d'essais d'éclatement instantané sous pression interne avec effet de fond (§ 2-2-7).

Le champ de contraintes appliqué est biaxial plan et les contraintes s'écrivent :

$$\sigma_x = \frac{PR}{2e} \quad (4-13) \quad \text{et} \quad \sigma_\theta = \frac{PR}{e} \quad (4-14)$$

où P est la pression, R le rayon moyen de la partie renforcée, e l'épaisseur moyenne de la partie renforcée,  $\sigma_x$  la contrainte axiale et  $\sigma_\theta$  la contrainte circonférentielle.

La figure 4-10 montre que le perlage (perte d'étanchéité) intervient pour une contrainte circonférentielle de 245 MPa (pression de 219 Bars) correspondant à une déformation circonférentielle de 1,04 % et une déformation axiale de 0,58 % (cette dernière valeur étant calculée par extrapolation de la courbe). Les fins de linéarité des courbes contrainte/déformation sont également mises en évidence, elles interviennent pour une contrainte circonférentielle de 142 MPa (pression de 121 Bars). Le coude de la courbe de comportement axial est beaucoup plus marqué que celui de la courbe de comportement circonférentiel et met nettement en évidence le début de l'endommagement global du matériau, qui intervient pour une déformation axiale de 0,16 % et une déformation circonférentielle de 0,55 %. Ces valeurs de déformations limites permettent de choisir la nature des mèches de carbone à retenir comme capteurs d'endommagement.



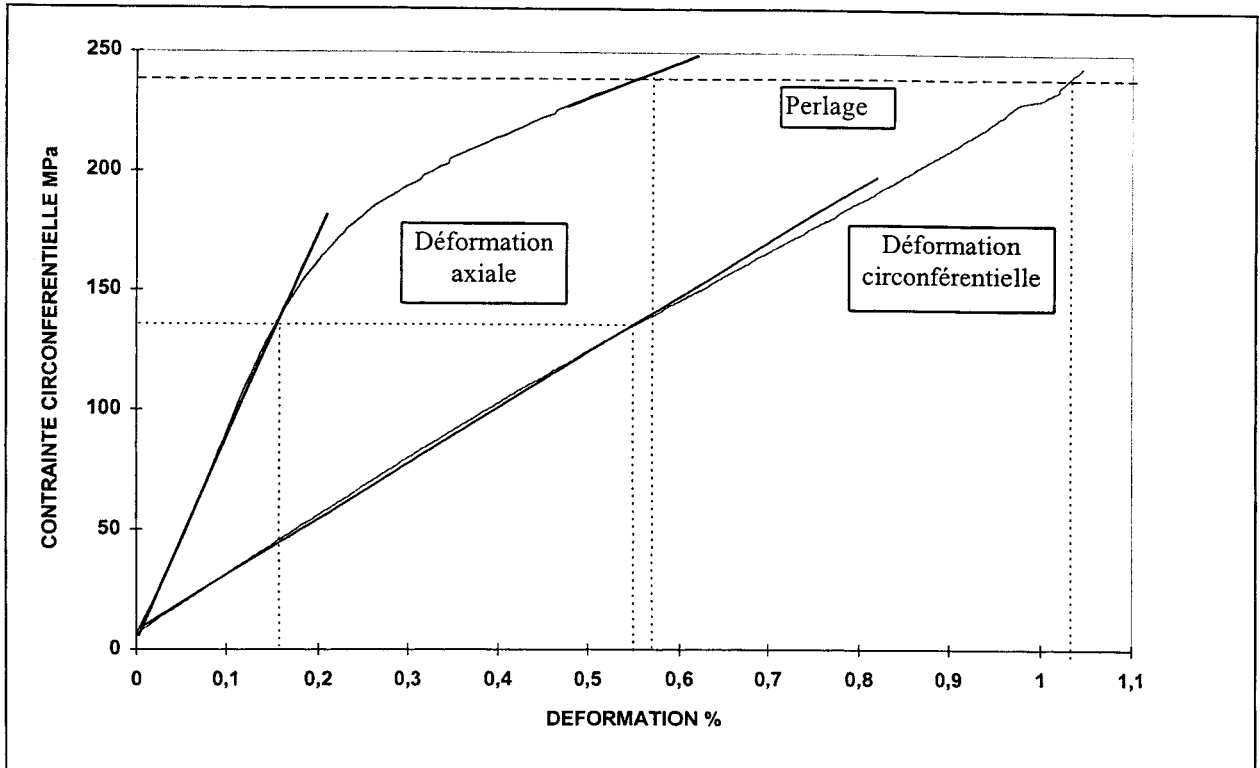


Fig. 4-10 : Lois de comportement des tubes sous pression interne

#### 4.3.1.2. Emplacement et nature des mèches de carbone servant de capteurs

L'emplacement des mèches de carbone est choisi de telle sorte que celles-ci puissent donner des renseignements sur les déformations axiales et circonférentielles du tube lors des essais d'éclatement : soit selon l'axe longitudinal du tube, soit suivant sa circonférence avec un angle de  $90^\circ$  par rapport à l'axe du tube (cf. fig. 4-11). La mèche circonférentielle est placée à mi-longueur du tube où la déformation circonférentielle est maximale.

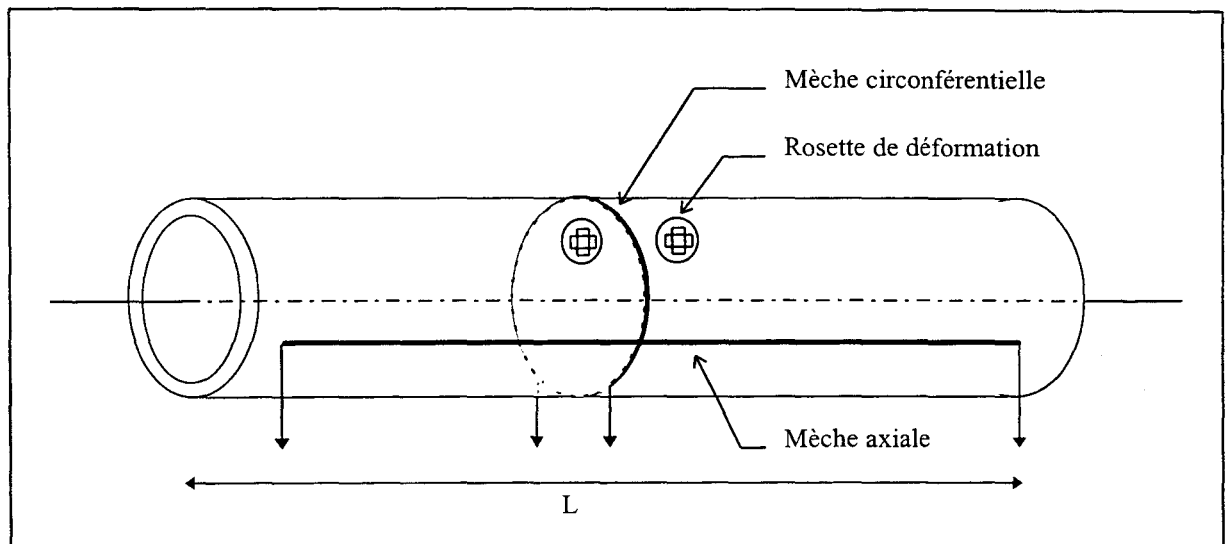
Les tubes sont instrumentés avec deux mèches permettant de déterminer les déformations suivant les directions axiales et circonférentielles. Les lois de comportement des tubes permettent de déterminer les caractéristiques des mèches de carbones à utiliser comme capteurs. La fin de linéarité des courbes contrainte/déformation correspond aux premiers signaux d'endommagement de la structure. Il convient donc, pour optimiser les capteurs, d'utiliser des mèches de carbone qui réagissent pour des déformations correspondant aux fins de linéarité des courbes de comportement mécanique des tubes.

Les fibres de carbone les plus fragiles cassent pour une déformation moyenne de 0,45 % (résultat obtenu en traction monoaxiale sur éprouvette cf. § 3-1-4), valeur supérieure à la déformation axiale correspondant à la fin de linéarité de la loi de comportement (0,16 %). Pour pouvoir caractériser le coude de la courbe axiale contrainte/déformation, il convient donc d'utiliser l'effet d'élongation des mèches. Les mèches de carbone les mieux adaptées sont les mèches d'allongement à la rupture 0,6 % et de nombre de filaments 3 K dont la pente à l'origine est quasiment linéaire avec une amplitude assez importante pour être mesurée. D'après les résultats obtenus sur les éprouvettes en traction, pour la déformation

correspondant au coude de la courbe de comportement axiale (0,16 %), l'augmentation de résistance électrique associée est de 0,05  $\Omega$ .

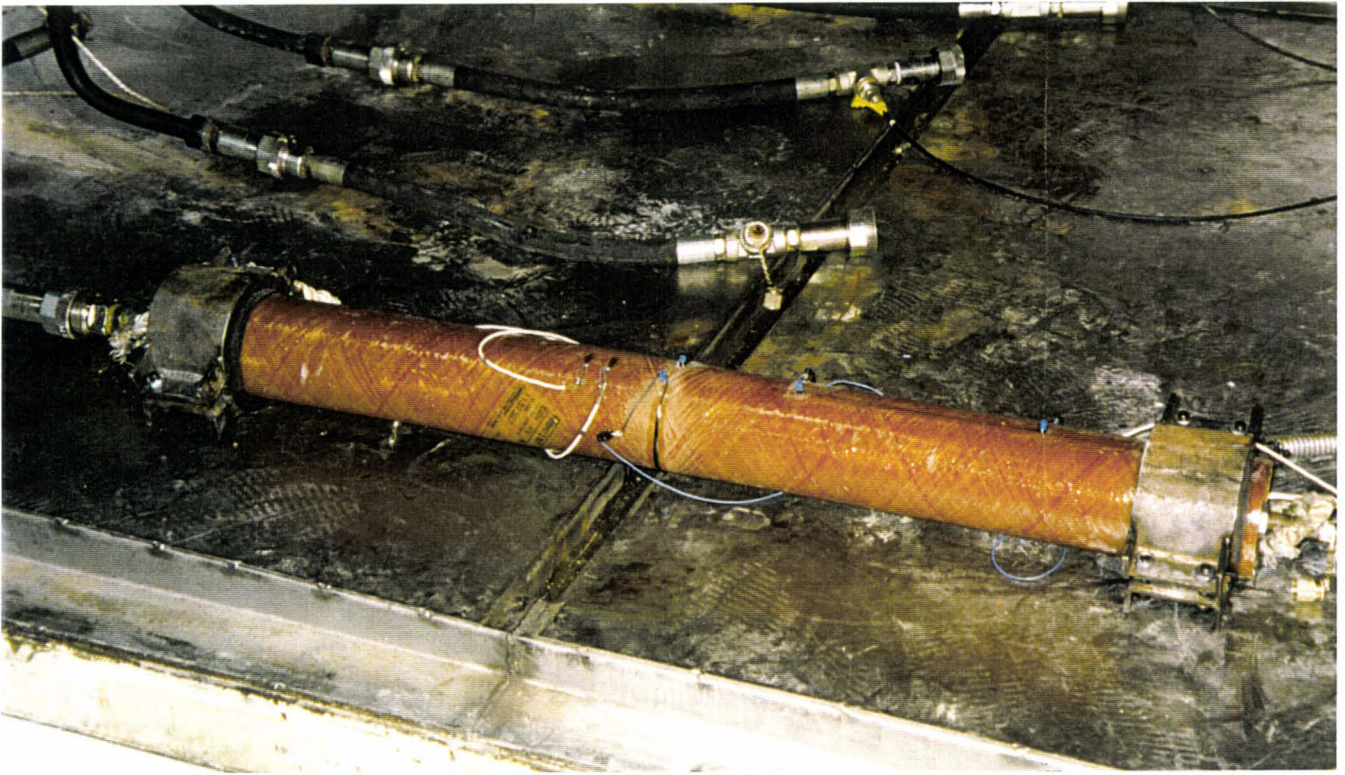
La déformation circonférentielle est plus importante, ce qui permet d'utiliser la rupture des fibres de carbone comme signal préventif. Pour caractériser le coude de la courbe contrainte/déformation circonférentielle, une mèche d'allongement à la rupture 0,36 % et de nombre de filaments 10 K dont la valeur moyenne de déformation correspondant au début des ruptures de fibres est de 0,45 %, paraît constituer le meilleur choix.

Enfin, dans l'optique d'une détection de la perte d'étanchéité (perlage), les mèches de carbone d'allongement à la rupture 0,6 % de nombre de filaments 3 K dont les premières ruptures de la mèche de carbone interviennent pour une déformation de 0,81 % avec une bonne reproductibilité, peuvent également être utilisées. Elles permettent de donner un signal d'alarme, juste avant le perlage des tubes pour une déformation correspondant à 80 % de la déformation de perlage.

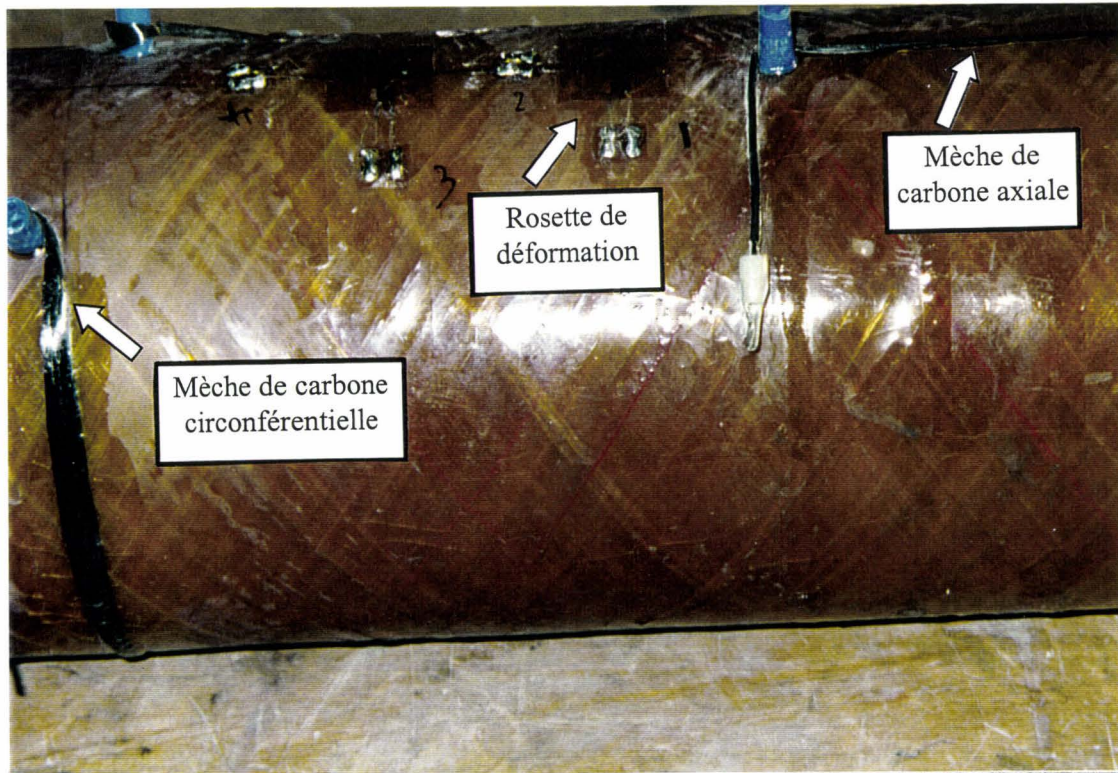


**Fig. 4-11 : Emplacement sur le tube des mèches de carbone servant de capteur d'endommagement**

Les moyens d'acquisition disponibles permettent de suivre la résistance électrique de deux mèches de carbone simultanément. Deux types d'instrumentation sur les tubes sont mis en place. La première instrumentation consiste à utiliser une mèche d'allongement à la rupture de 0,6 % et de nombre de filaments 3 K, placée dans le sens axial du tube dont l'augmentation de résistance électrique due à l'élongation des fibres est mesurée. Cette mèche permet de déterminer la fin de linéarité de la courbe de comportement axial. Une deuxième mèche d'allongement à la rupture 0,36 % et de nombre de filaments 10 K est placée circonférentiellement. La rupture des fibres sert de signal pour cette dernière mèche et permet de déterminer le coude de la courbe de comportement circonférentiel. Un deuxième type d'instrumentation peut être mis en place avec la même mèche axiale et une mèche circonférentielle d'allongement à la rupture 0,6 % et de nombre de filaments 3 K. Sur cette dernière mèche l'augmentation de résistance électrique due à la rupture des fibres sert à déterminer l'approche du perlage.



**Photo. 1 : Tube avec bouchons prêt à être mis sous pression**

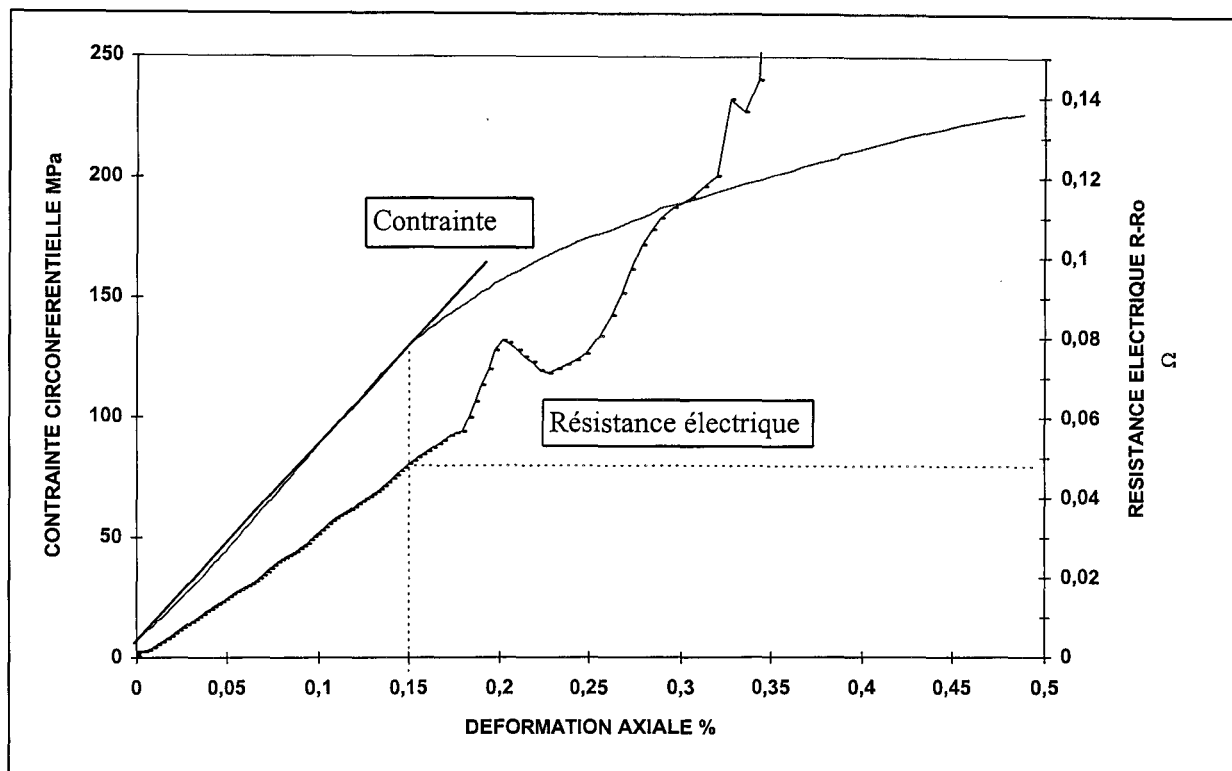


**Photo. 2 : Instrumentation du tube (jauges et mèches de carbone)**

### 4.3.1.3. Résultats en éclatement instantané

#### 4.3.1.3.1. Capteur axial

La figure 4-12 présente, la loi de comportement axial du tube, ainsi que l'augmentation de résistance électrique du capteur en fonction de la déformation.



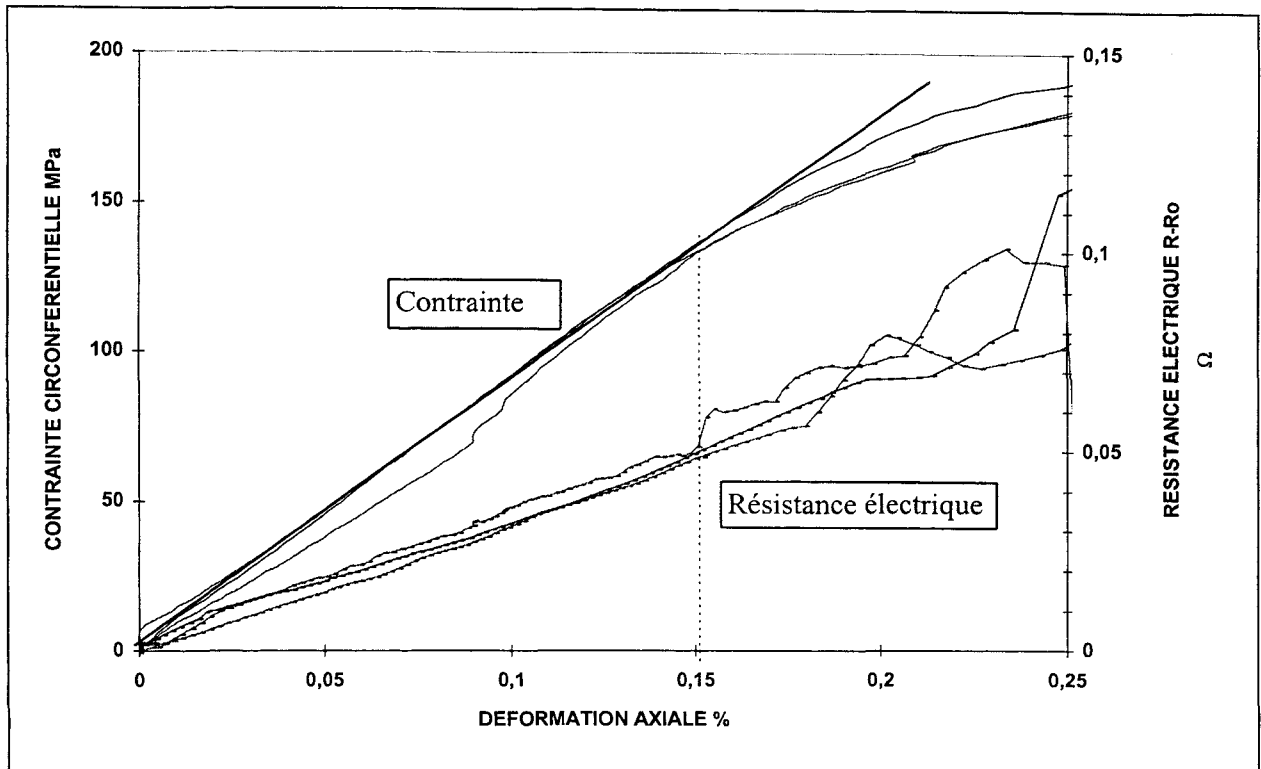
**Fig. 4-12 : Réponse du capteur axial  
(fibre d'allongement à la rupture 0,6 % et de nombre de filaments 3 K)**

Le coude de la courbe contrainte/déformation intervient pour une déformation de 0,15 % et l'augmentation de résistance électrique associée est égale à 0,048  $\Omega$ , ce qui correspond à la valeur prévue avant l'essai. On peut remarquer par ailleurs, que la courbe de résistance électrique, présente des écarts à la linéarité importants à partir de 0,2 % de déformation; alors que dans le cas des tractions monoaxiales effectuées sur éprouvettes, les courbes de résistances électriques sont linéaires jusqu'à une déformation de 0,7 % correspondant aux premières ruptures des fibres. Cette différence de comportement peut s'expliquer par le caractère biaxial de la sollicitation imposée aux tubes. En effet pour une déformation axiale de 0,2 %, la déformation circonférentielle est beaucoup plus importante, de l'ordre de 0,8 %. Le déplacement des fibres de carbone dans la direction circonférentielle peut alors entraîner une modification des contacts transverse entre les fibres de carbone et provoquer la rupture de certaines fibres de carbone du fait de leur enchevêtrement.

La reproductibilité des résultats se révèle satisfaisante comme le montre la figure 4-13 qui présente les réponses de capteurs axiaux pour trois tubes différents. Pour la déformation correspondant aux coudes des courbes contrainte/déformation, les trois capteurs enregistrent



des augmentations de résistance de l'ordre de  $0,05 \Omega$ . Cependant, on note une divergence des courbes après 0,2 % de déformation, due aux effets des sollicitations transverses.



**Fig. 4-13 : Reproductibilité des réponses des capteurs axiaux**

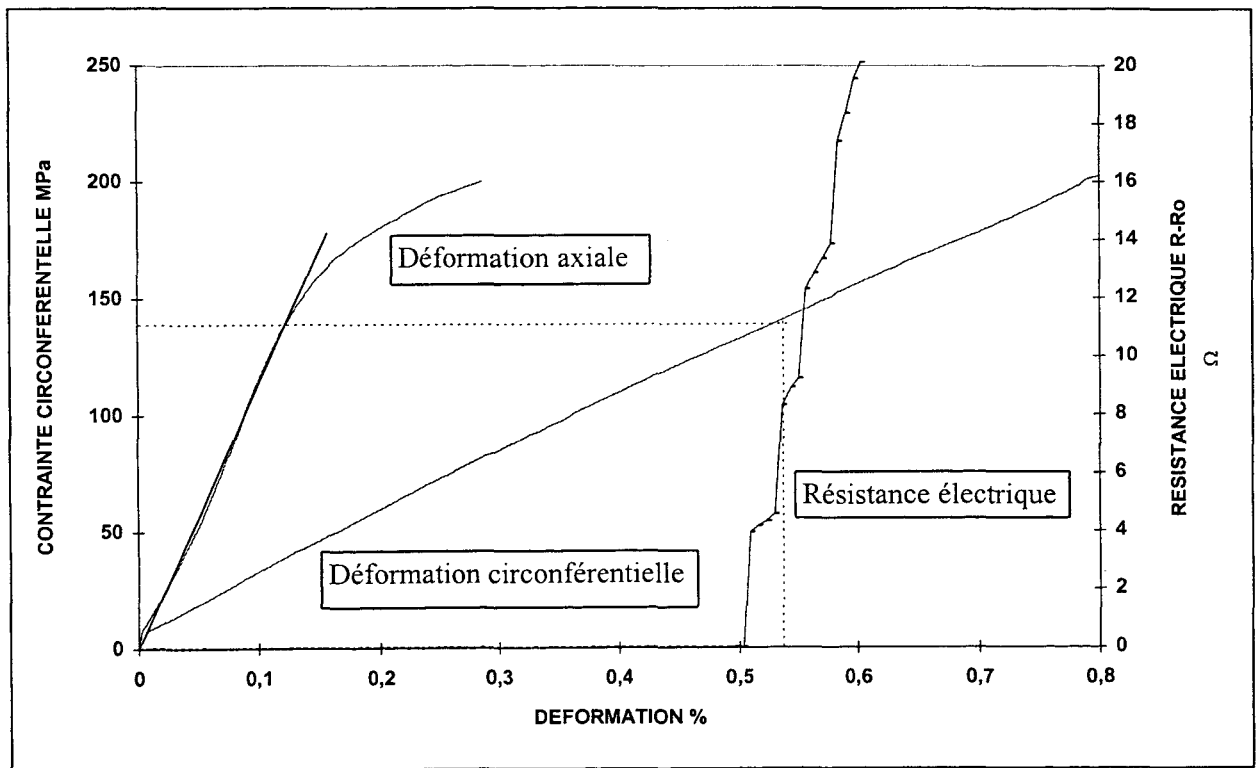
L'obtention d'une bonne reproductibilité demande à veiller à ne pas endommager la mèche de carbone lors de la mise en oeuvre. En effet, si des filaments de carbone sont préalablement cassés lors de l'instrumentation du tube, l'augmentation de résistance électrique mesurée est alors supérieure à celle correspondant au seul phénomène d'élongation de la mèche, car vient s'ajouter l'augmentation de résistance électrique provenant de la perte de contact progressive de fibres cassées entre elles. Lorsque l'augmentation de résistance électrique suivie est la résistance électrique due à l'élongation, compte-tenu de la très faible amplitude des résistances électriques mesurées, les augmentations de résistances parasites décrites plus haut viennent fausser les mesures de manière non négligeable. Il est donc primordial de définir une procédure de mise en oeuvre des mèches de carbone servant de capteurs garantissant absolument l'intégrité de la mèche de carbone.

#### 4.3.1.3.2. Capteur circonférentiel

La figure 4-14 présente les lois de comportement contrainte/déformation axiales et circonférentielles ainsi que l'évolution de la résistance électrique d'une mèche de carbone circonférentielle d'allongement à la rupture 0,36 %. L'augmentation brusque de la résistance électrique due à la rupture des fibres de carbone intervient pour une déformation de 0,5 % (valeur moyenne sur éprouvettes 0,45 %), soit pour un niveau de pression précédant juste les premiers endommagements du matériau. Le capteur joue donc bien son rôle de capteur préventif de l'endommagement global de la pièce composite instrumentée. Le capteur réagit

bien avant le perlage du tube qui intervient pour une déformation de 1,05 %, ce qui permet d'avoir le temps d'arrêter l'augmentation de la contrainte exercée sur la pièce avant la ruine finale de celle-ci.

Il est intéressant de noter que la pente de la courbe de résistance électrique/déformation est beaucoup plus importante lors des essais sur tubes que lors des essais sur éprouvettes (cf. § 3-1-2-3). Cela peut s'expliquer par l'effet de la conduction transverse qui intervient au niveau de la mèche de carbone et qui freine l'augmentation de la résistance électrique (cf. § 4-3-2-2). Dans le cas des tubes, la contrainte biaxiale imposée a tendance à écarter les fibres de carbone les unes des autres dans la direction perpendiculaire à l'axe de la mèche de carbone. La conduction transverse est alors fortement affaiblie, d'où l'augmentation de résistance électrique plus rapide observée par rapport aux essais sur éprouvettes.



**Fig. 4-14 : Réponse du capteur circonférentiel  
(allongement à la rupture 0,36 %, nombre de filaments 10 K)**

La reproductibilité des résultats est analysée sur trois tubes différents (cf. fig. 4-15). Une bonne reproductibilité des mesures électriques est obtenue, comme le montre le tableau 4-10. La déformation moyenne de fin de linéarité des courbes de résistance électrique observée sur tube (0,51 %) est un peu plus importante que celle relevée sur éprouvettes (0,45 %). En revanche la dispersion entre les différentes mesures, et notamment pour les fortes résistances électriques, semble plus faible sur tubes que sur éprouvettes (cf. § 3-1-4).

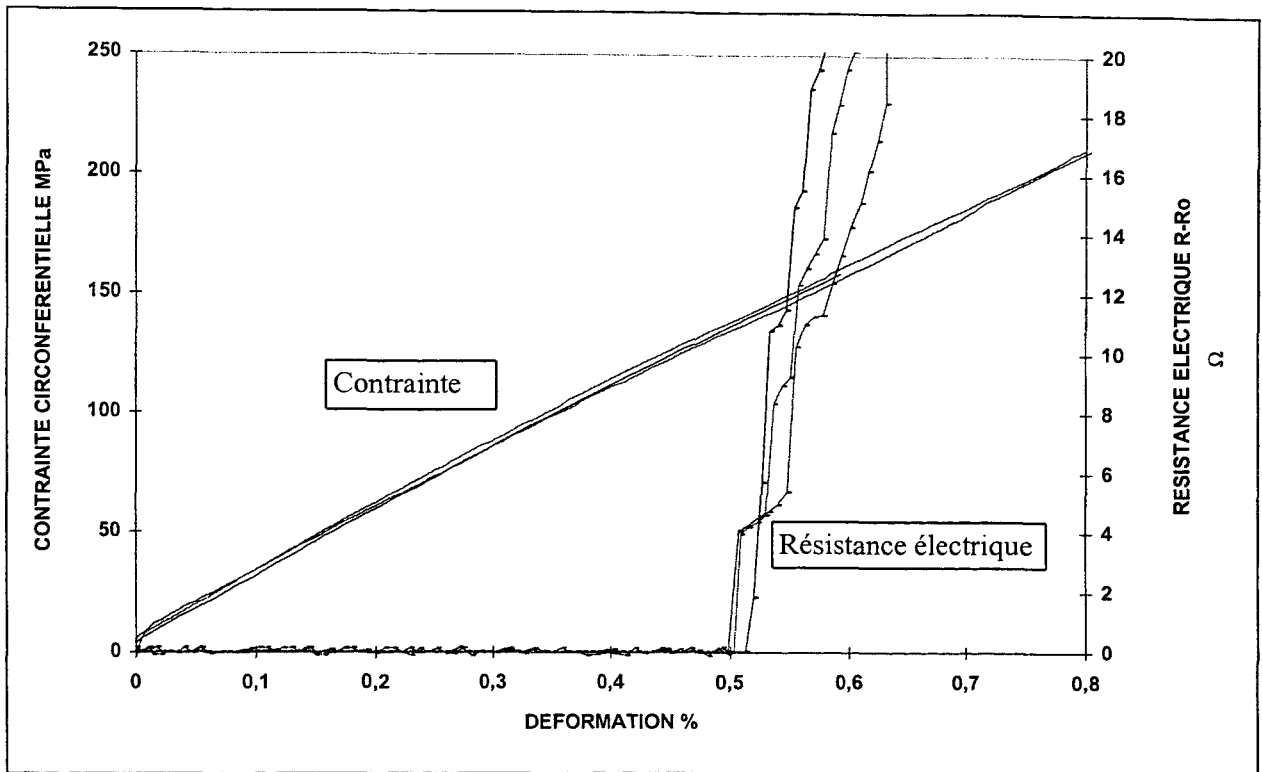


Fig.4-15 : Reproductibilité des mesures pour le capteur circonférentiel ( allongement à la rupture 0,36 %, nombre de filaments 10 K)

	Moyenne $\epsilon_{\text{moy}}$ (%)	Ecart type $\Delta\epsilon/\epsilon_{\text{moy}}$ (%)	Dispersion $\Delta\epsilon_{\text{max}}/\epsilon_{\text{moy}}$ (%)
Déformations à la fin de linéarité	0,51	1,37	3,1
Déformations pour une résistance de 2 $\Omega$	0,51	1,57	3,5
Déformations pour une résistance de 20 $\Omega$	0,58	3,62	5,4

Tableau 4-9 : Reproductibilité des mesures sur tubes en pression interne

Un essai effectué avec une mèche de carbone circonférentielle d'allongement à la rupture 0,6 % génère une augmentation de résistance électrique qui s'effectue en deux temps (première augmentation à 0,67 % de déformation et deuxième augmentation pour 0,79 %). L'allongement à la rupture des fibres attendue d'après les déformations trouvées sur éprouvettes correspond à la deuxième augmentation de résistance électrique. L'augmentation la plus importante de la résistance électrique intervient comme prévue pour 77 % de la déformation de perlage. La première augmentation de résistance électrique provient sans doute d'une fragilisation de la mèche de carbone lors de sa mise en oeuvre, d'autres essais seraient donc nécessaires pour conclure sur la fiabilité de la réponse de ce type de mèche de carbone sur tube.

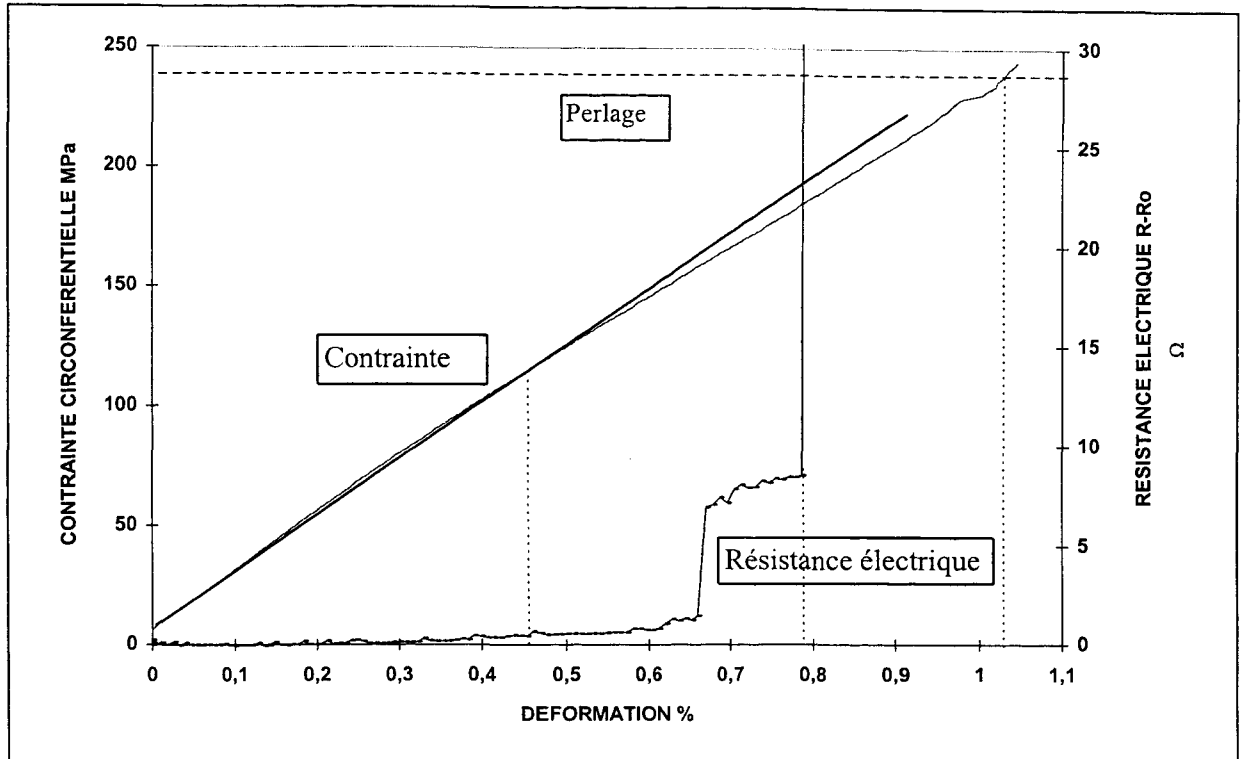


Fig. 4-16 : Réponse du capteur circonferentiel ( allongement à la rupture 0,6 %, nombre de filaments 10 K)

#### 4.3.1.3.3. Application sur les tubes de la modélisation de la réponse électrique du capteur

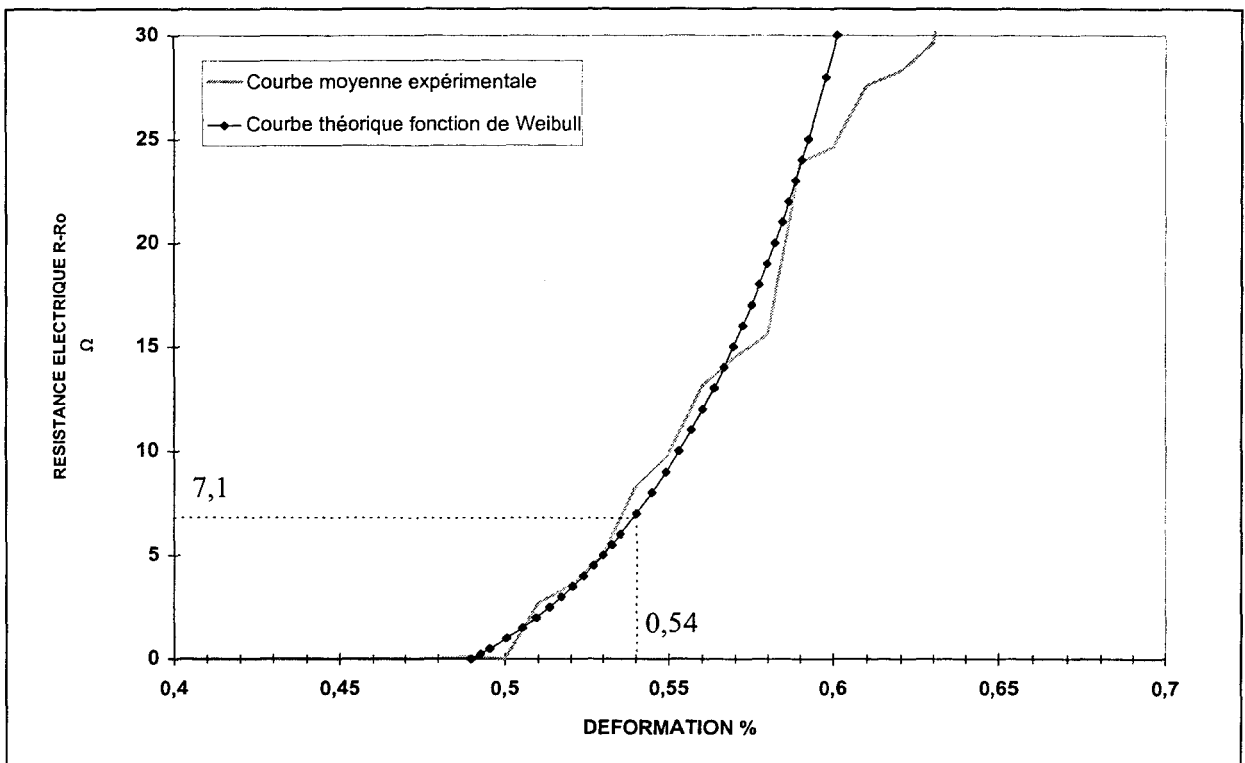
L'objectif est de déterminer le niveau de premier endommagement du tube (indiqué par le coude de la courbe contrainte/déformation) à partir d'un tube sous pression interne instrumenté uniquement d'une mèche de carbone circonferentielle ( $\epsilon_{\text{rupture}} = 0,36 \%$ ). Pour cela, il convient de calculer la déformation du tube à partir de l'augmentation de résistance électrique due à la rupture des fibres de carbone par un modèle approprié. Ensuite, la valeur de la déformation calculée est comparée avec la déformation des premiers endommagements de la structure déterminée précédemment par l'utilisateur, ici on considère la valeur de déformation seuil correspondant au coude des courbes contrainte/déformation ( $0,54 \% \pm 0,005$ ). On suppose par ailleurs que les courbes résistance électrique/déformation des mèches soumises à une sollicitation biaxiale puissent être modélisées avec le même type d'équations que celles associées à une sollicitation de traction monoaxiale. La déformation critique  $0,54 \%$  se situant juste au-dessus de la déformation de rupture des mèches de carbone ( $0,51 \% \pm 0,007$ ), il convient d'utiliser un modèle de Weibull (cf. § 4-2-2), afin de modéliser la courbe résistance électrique/déformation. Le tableau 4-10 présente les coefficients de l'équation de Weibull (cf. éq. 4-10) appliquée aux tubes, qui sont calculés à partir de la méthode des moindres carrés. La courbe calculée ainsi donne une bonne approximation de la courbe expérimentale (courbe moyenne pour trois tubes), jusqu'à une déformation de  $0,59 \%$  (cf. fig. 4-17).



Ainsi simplement à partir de la mesure de résistance électrique, l'utilisateur est en mesure de savoir si la structure est endommagée ou non. Pour une augmentation de résistance électrique inférieure à  $7,1 \Omega$ , la déformation calculée par le modèle est inférieure au seuil des premiers endommagements du tube : la structure n'est pas endommagée. A l'inverse, si la résistance électrique mesurée est supérieure à  $7,1 \Omega$ , cela signifie que le tube est endommagé.

$R_{o\text{ moy}} (\Omega)$	L (m)	$\varepsilon_s$ (%)	m	$\varepsilon_0$ (%)
4,889	0,314	0,49	0,95	0,0178

**Tableau 4-10 : Coefficients du modèle de Weibull appliqué aux tubes sous pression interne**

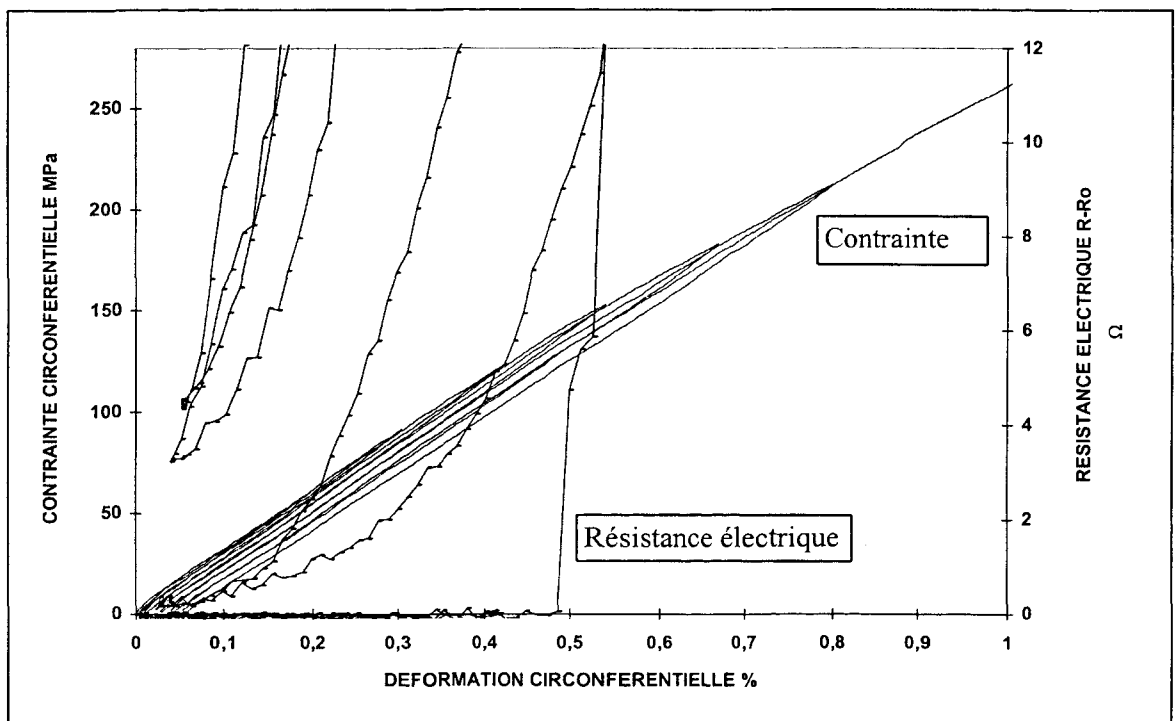


**Fig. 4-17 : Modélisation de la courbe résistance électrique/déformation par une fonction de Weibull**

L'équation de modélisation trouvée permet d'écrire un code de calcul déterminant, en temps réel pour un tube instrumenté sous pression, si le seuil de premier endommagement est dépassé ou non. L'objectif de développer une pièce composite capable d'autocontrôler son état d'endommagement est donc atteint puisque à partir de la seule mesure électrique du capteur, un diagnostic de l'intégrité structurale de la pièce est réalisé. Une application industrielle peut par la suite être envisagée, consistant à développer un système de contrôle préventif pour un réseau de canalisations composites sous pression.

#### 4.3.1.4. Résultats sous chargement répété progressif

Les essais en chargement répété progressif sous pression interne ont pour objectif de vérifier l'existence de la résistance électrique résiduelle du capteur lors de son utilisation sur tube. Ils sont effectués en augmentant à chaque cycle la pression maximale imposée au tube de 25 Bars sur une plage de 50 Bars à 175 Bars (cf. fig. 4-18). La mèche de carbone circonférentielle d'allongement à la rupture 0,36 % présente une première augmentation de résistance électrique pour une déformation circonférentielle de 0,49 %. Dès le premier cycle après rupture de la mèche de carbone une résistance électrique résiduelle non négligeable subsiste. Son évolution en fonction de la déformation maximale imposée est présentée sur la figure 4-19. Les valeurs de résistance électrique résiduelle mesurées sur tubes sont nettement supérieures à celles obtenues sur éprouvettes, dans la mesure où la sollicitation biaxiale engendre des résistances électriques maximales plus élevées.



**Fig. 4-18 : Essai de chargement répété progressif en pression interne (réponse de la mèche de carbone circonférentielle d'allongement à la rupture 0,36 %)**

Pour la mèche de carbone axiale d'allongement à la rupture 0,6 %, une résistance électrique résiduelle est aussi présente à partir de la déformation maximale atteinte de 0,26 % (cf. fig. 4-20). L'apparition d'une résistance électrique résiduelle, alors que la déformation dans le sens de la mèche est beaucoup plus faible que l'allongement à la rupture des fibres, confirme l'hypothèse de ruptures de fibres par sollicitation transverse. L'amplitude de cette résistance électrique résiduelle est cependant nettement plus faible que la résistance électrique résiduelle obtenue avec la mèche de carbone circonférentielle.

Il est donc possible d'utiliser la résistance électrique résiduelle de la mèche de carbone comme mémoire des éventuels endommagements subis par les tubes après suppression de la pression interne appliquée.

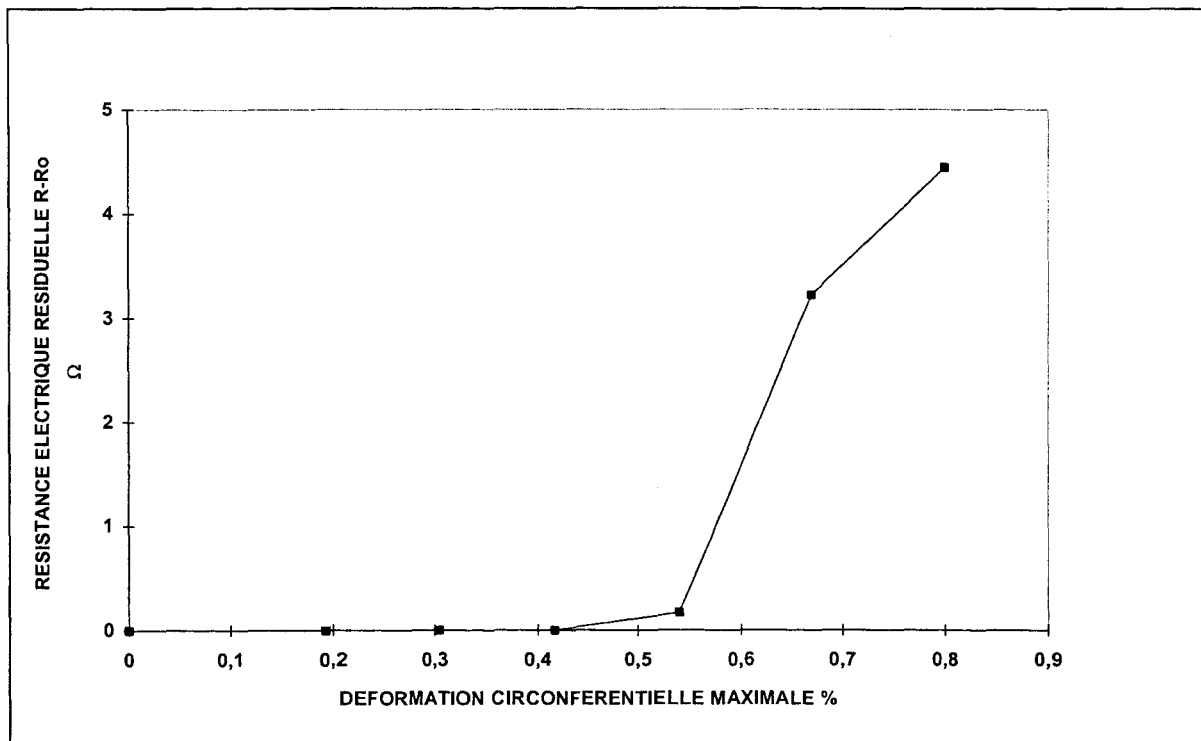


Fig. 4-19 : Augmentation de la résistance électrique résiduelle d'une mèche de carbone circonférentielle (allongement à la rupture 0,36 %) lors d'un essai en chargement répété progressif sur tube sous pression interne

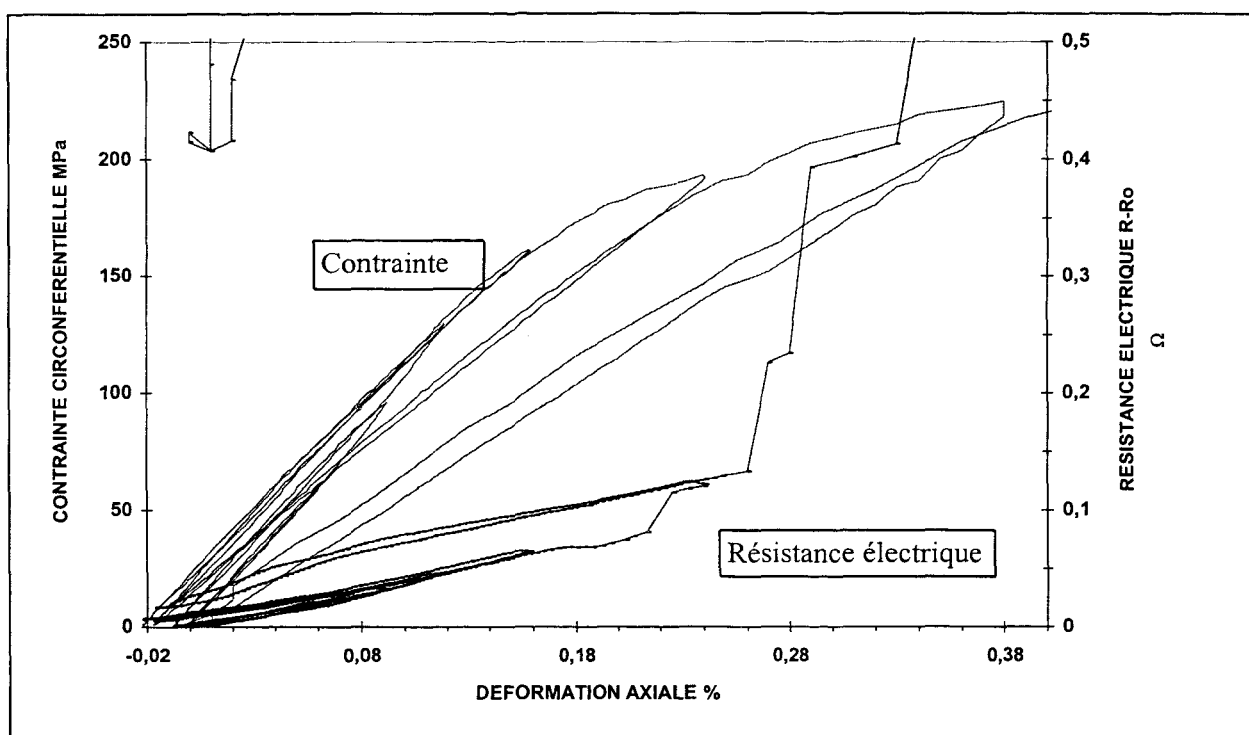


Fig. 4-20 : Essai de chargement répété progressif sur tube sous pression interne (réponse de la mèche de carbone axiale d'allongement à la rupture 0,6 %)

### 4.3.1.5. Résultats en fatigue dynamique

Pour conclure l'étude sur les tubes sous pression interne, des essais de fatigue sont réalisés à contrainte imposée. La mèche de carbone utilisée possède un allongement à la rupture de 0,36 % et est positionnée sur la circonférence du tube. La pression maximale (115 MPa) est fixée à 17 % en dessous du niveau de premier endommagement de la mèche de carbone utilisée comme capteur (139 MPa). Cela correspond à une contrainte inférieure de 20 % à la contrainte au coude de la courbe de comportement axial. Cet essai permet donc de simuler une utilisation intensive du tube à un niveau de sollicitation proche de l'endommagement critique de la structure. La fréquence de sollicitation est fixée à 25 cycles par min.

Les résultats (cf. fig. 4-21) montrent qu'après 8200 cycles le capteur d'endommagement réagit, tandis que le perlage du tube n'intervient qu'au bout de 14 000 cycles. Le signal du capteur d'endommagement intervient pour une chute du module axial de 24 % et une chute du module circonférentiel de 5 %. Lors de cette première réponse électrique la déformation circonférentielle du tube est alors de 0,50 %. Une augmentation de la résistance électrique minimale de 0,45  $\Omega$  après 14 000 cycles est également relevée.

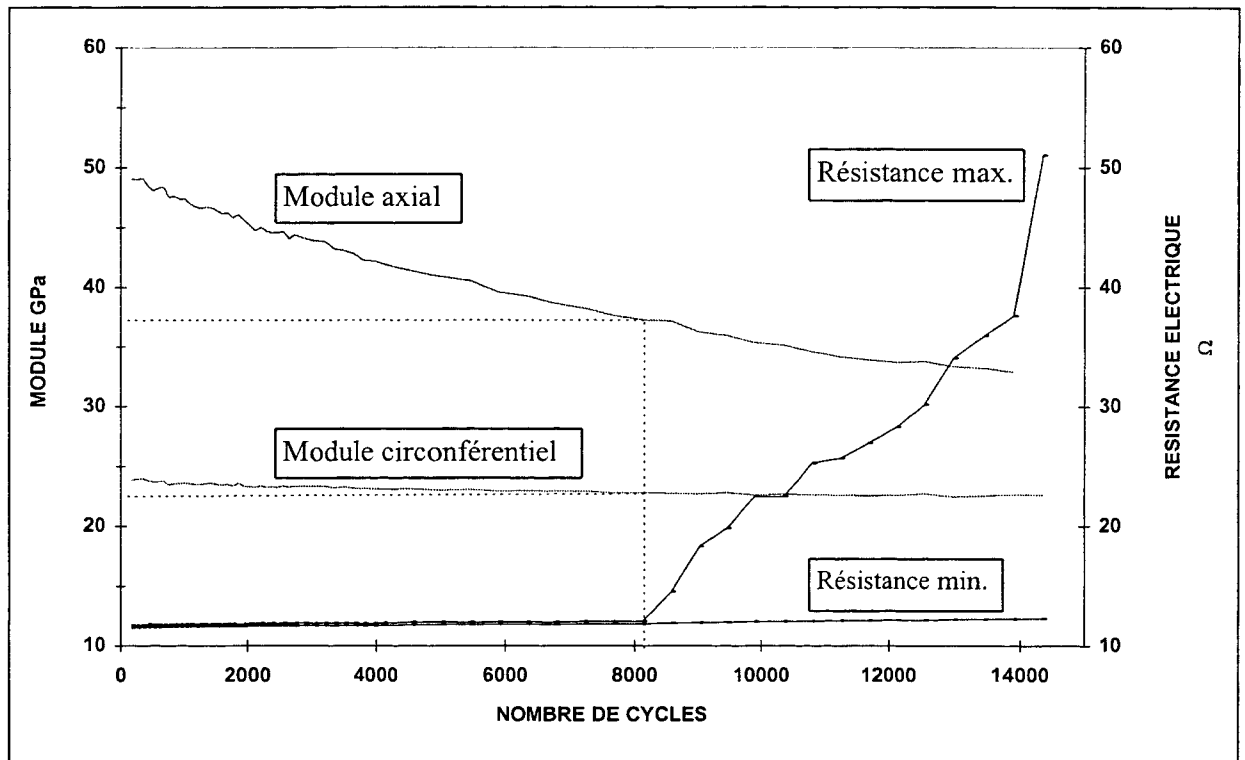


Fig. 4-21 : Essai d'un tube sous pression en fatigue dynamique

Un second essai effectué à pression maximale (128 MPa) inférieure de 10 % à la contrainte à la rupture de la mèche de carbone montre que la réponse du capteur intervient beaucoup plus rapidement : après seulement 110 cycles de sollicitation.

Les essais de fatigue sur tube démontrent la possibilité des capteurs de contrôler l'état d'endommagement des tubes et d'envoyer un signal préventif, alors que la structure est soumise à des contraintes cycliques, sollicitations qui simulent sur un temps limité l'action à long terme des contraintes supportées par le tube en conditions réelles d'utilisation.

#### 4.3.1.6. Bilan des essais sur tubes

Les essais sur tubes ont permis d'appliquer avec succès les procédures d'utilisation des mèches de carbones énoncées aux paragraphes précédents. Ainsi, les tubes dont on connaît la sollicitation (pression interne avec effet de fond) et les lois de comportement mécaniques sont instrumentés avec des mèches de carbone possédant des caractéristiques physiques choisies en fonction des essais préliminaire effectués sur éprouvettes. Certains résultats des capteurs résistifs obtenus lors des essais sur tubes sont conformes à ceux attendus d'après les essais en traction sur éprouvettes (augmentation de résistance électrique due à l'élongation des fibres similaire, déformation de première rupture de fibres de la mèche d'allongement à la rupture 0,36 % égale à celle obtenue sur éprouvette à 0,06 % près). En revanche après les premières ruptures de fibres l'augmentation de la résistance électrique est plus importante sur tubes que sur éprouvettes du fait de la contrainte biaxiale qui affaiblit les contacts transverses entre fibres de carbone.

Pour déterminer l'état d'endommagement des tubes, les réponses électriques des capteurs peuvent être utilisées de plusieurs manières. L'utilisation de la résistance électrique due à l'élongation des fibres donne des résultats satisfaisants, cependant la réponse obtenue est réversible et la mise en oeuvre de la mèche servant de capteur est délicate.

La prise en compte de la réponse électrique due à la rupture des fibres du capteur permet l'utilisation du capteur résistif comme fusible en considérant la structure endommagée dès qu'une augmentation de résistance électrique est mesurée (bien que l'endommagement visualisé par les coudes des courbes contrainte/déformation axiales et circonférentielles intervienne pour une déformation circonférentielle légèrement supérieure à celle des premières ruptures de la mèche de carbone). Ainsi, grâce à la mesure de la résistance électrique résiduelle (mise en évidence également sur tubes lors des essais dynamiques), le contrôle de l'intégrité du tube peut être effectuées de façon périodique.

Afin de déterminer le seuil d'endommagement des tubes de façon encore plus précise, il convient de modéliser la courbe résistance électrique/déformation pour connaître directement la déformation exercée sur le tube à partir d'une mesure de résistance électrique. Cette dernière méthode constitue la procédure la plus aboutie de l'utilisation du capteur d'endommagement.

Les essais de fatigue dynamique ont ensuite permis de valider le fonctionnement des capteurs développés sur tubes pour des sollicitations aux effets se rapprochant de ceux occasionnés à long termes par une utilisation en condition réelles.

L'objectif de développer une pièce industrielle capable d'autocontrôler son intégrité structurale est donc atteint. Il reste simplement à mettre au point les techniques d'intégration de la mèche de carbone au sein du tube lors de sa fabrication par enroulement filamentaire pour finaliser le développement des tubes instrumentés.

### 4.3.2. Sièges pour transport ferroviaire sous chargement de fatigue

Après la validation des capteurs d'endommagement développés sur des tubes (pièces industrielles de géométrie simple du fait de leur symétrie de révolution), l'étape suivante consiste à instrumenter une pièce industrielle de géométrie plus complexe. La structure retenue (parce que disponible au laboratoire dans le cadre d'une autre étude) est un siège de métro en S.M.C. (Sheet Moulding Compound), soumise à une sollicitation combinée de fluage et de fatigue dynamique à contrainte imposée à une fréquence de 1,5 Hz. Une masse de 60 kg est posée sur l'assise du siège tandis que le dossier est actionné par un vérin de force réglable (cf. photo. 3). Des essais préliminaires montrent que les zones présentant les premiers signes d'endommagement sont les deux renforts internes de l'assise (zone hachurée sur la figure 4-22).

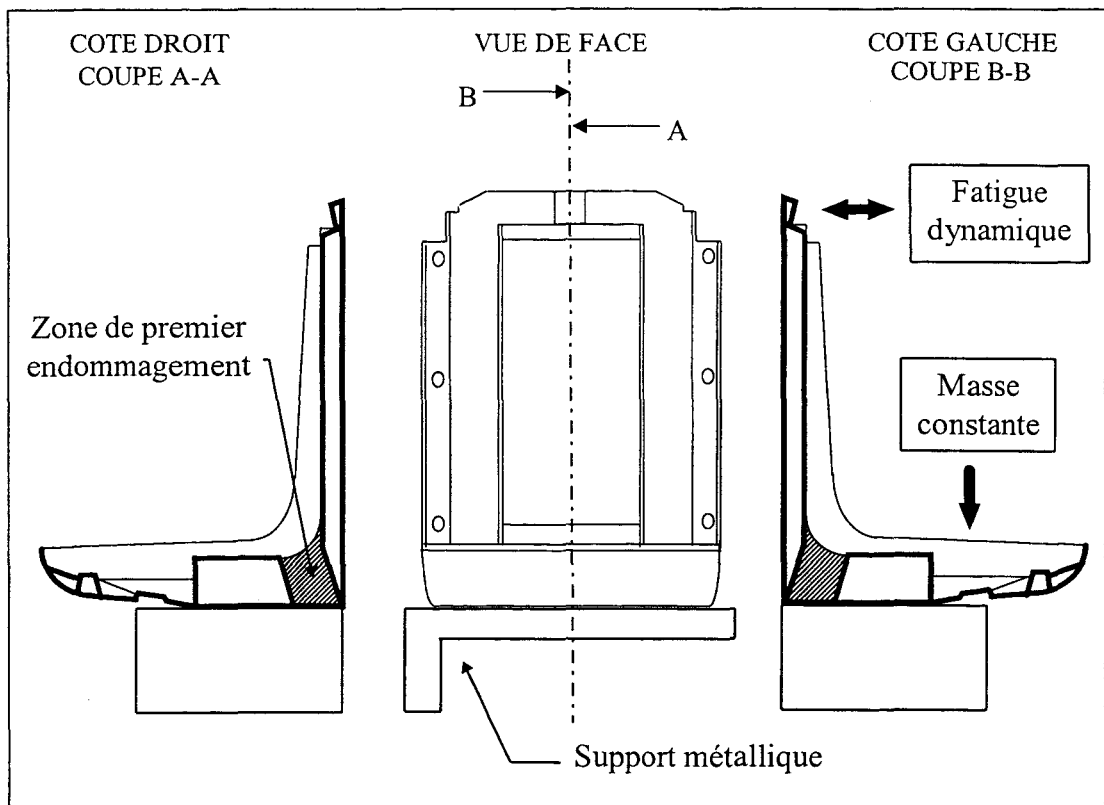


Fig. 4-22 : Schéma des sièges GEC-ALSTHOM

#### 4.3.2.1. Etude des caractéristiques mécaniques du matériau pour le choix et le positionnement des capteurs d'endommagement

Afin d'obtenir une analyse plus fine des déformations exercées sur la partie critique du siège quatre jauges sont positionnées comme indiqué sur la figure 4-23. La direction principale des jauges d'extensométrie est perpendiculaire au bord gauche du renfort interne. En effet, les essais préliminaires mettent en évidence que les fissurations, résultant de l'endommagement en fatigue du siège, adoptent généralement une direction parallèle au bord

gauche du renfort. La direction perpendiculaire correspond donc à la direction des déformations maximales induites dans cette zone lors des essais de fatigue.

Un essai de fatigue est réalisé avec une force de 65 daN appliquée sur le vérin qui actionne le dossier du siège à une fréquence de 1,5 Hz. La direction de la force appliquée est réglée afin que les déformations au niveau de la zone sollicitée aient lieu essentiellement en traction.

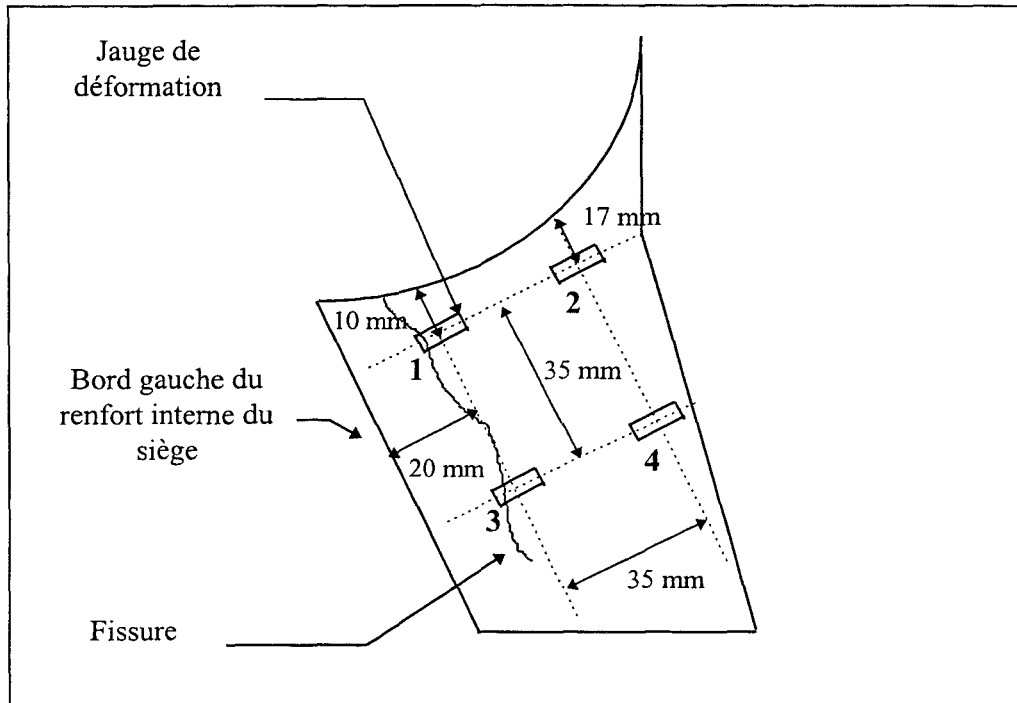


Fig. 4-23 : Position des jauges d'extensométrie

N° jauge	Jauge 1	Jauge 2	Jauge 3	Jauge 4
Déformation max.	0,14 %	0,03 %	0,08 %	0,02 %

Tableau 4-11 : Cartographie des déformations de la pièce de renfort interne du siège

Les déformations maximales détectées par les différentes jauges sont relativement faibles (cf. tab. 4-11), cependant pour le niveau de contrainte imposée, une fissuration intervient très rapidement, elle entraîne la rupture de la jauge 1 après 5 min. d'essai (200 cycles) et celle de la jauge 3 après 12 min. (480 cycles). Les jauges de déformation permettent de confirmer que la zone la plus sollicitée se situe au niveau de la jauge n°1. La déformation induite diminue ensuite lorsque l'on s'éloigne vers le coté droit de la pièce de façon très nette. Une baisse de déformation plus modérée est aussi observée vers le bas de la pièce.

Les faibles niveaux de déformations observés ( $< 0,2 \%$ ) avant rupture peuvent paraître surprenants dans la mesure où dans la littérature, les déformations à la rupture de matériaux S. M. C. pour des essais de traction statique se situent plutôt au alentours de 1 à 2 % [59, 60]. A titre de vérification, des essais de traction statique sont effectués sur des éprouvettes prélevées sur le dossier du siège. Ceux-ci confirment la faiblesse des déformations à la rupture (de l'ordre de 0,4 %) et des déformations de premiers endommagements (0,05 %), (cf. fig. 4-24). L'observation des faciès de rupture obtenus permet de voir que les fibres de verre ne sont pratiquement pas imprégnées par la résine. Pour les matériaux composites à fibres coupées, l'amorçage de l'endommagement est pratiquement toujours engendré par un mécanisme de décohésion au niveau de l'interface fibre/matrice [61]. La déficience mise en évidence au niveau de l'interface fibre/matrice du matériau étudié peut donc expliquer les mauvaises propriétés mécaniques de celui-ci et notamment sa faible elongation à la rupture.

La cartographie des déformations réalisée conduit à définir l'emplacement optimal du capteur d'endommagement : perpendiculaire au bord gauche de la pièce et le plus près possible du bord supérieur (cf. fig. 4-25). Les déformations induites avant la fissuration de la pièce étant très faibles, le type de capteur choisi est une mèche de carbone dont la réponse électrique due à la rupture des fibres intervient pour 0,45 % de déformation (allongement à la rupture donnée par le fournisseur de 0,36 %). Celle-ci cassera à l'approche du front de fissuration. Dans les conditions présentes, il n'est pas possible d'obtenir un capteur réellement préventif (donnant une indication avant les premières fissurations) en raison du niveau faible et pratiquement constant de la déformation avant l'apparition de fissurations. Cependant, la pièce de renfort interne de l'assise est la première zone à être endommagée et le siège doit encore subir, après ces premières fissurations, un nombre important de cycles avant sa ruine finale. L'intérêt de l'instrumentation subsiste donc.

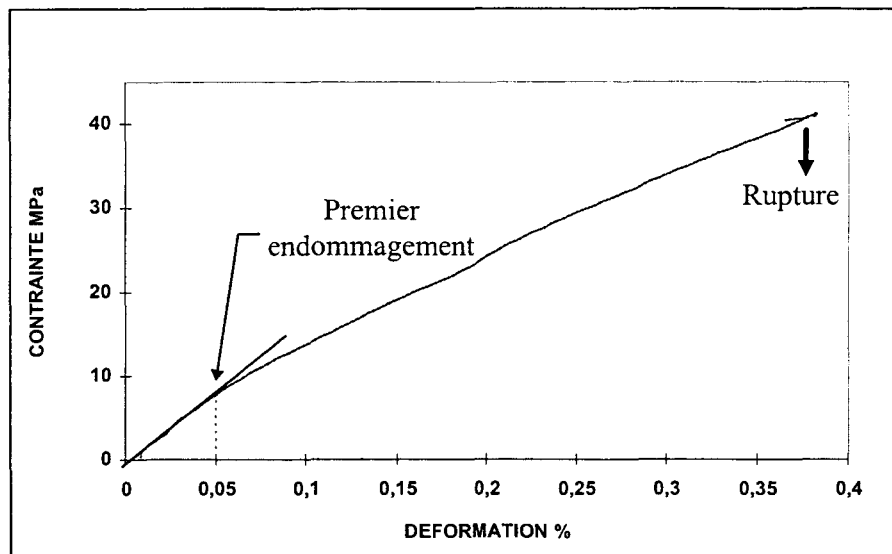


Fig. 4-24 : Essai de traction sur une éprouvette S.M.C.





Photo. 3 : Sièges sur banc d'essai

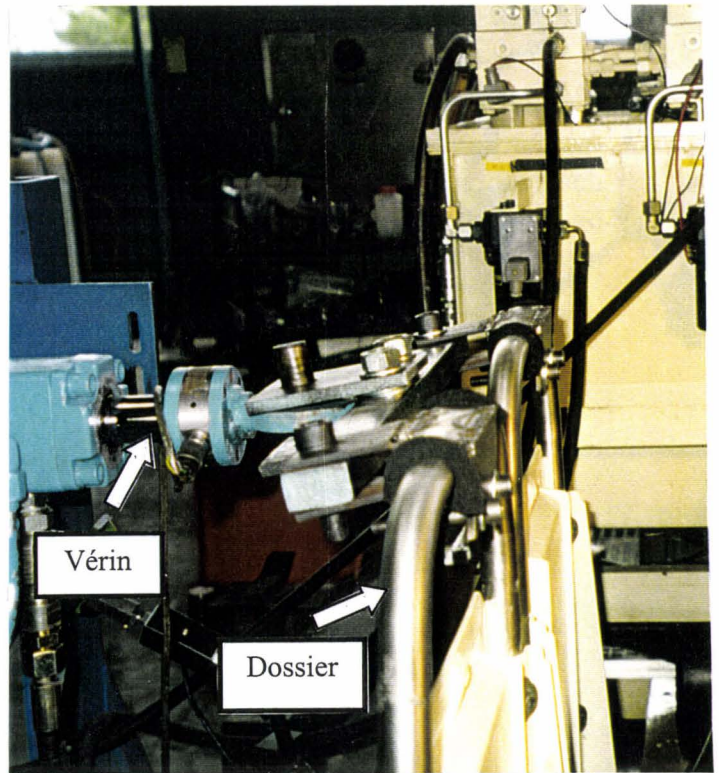


Photo. 4 : Vue du vérin hydraulique

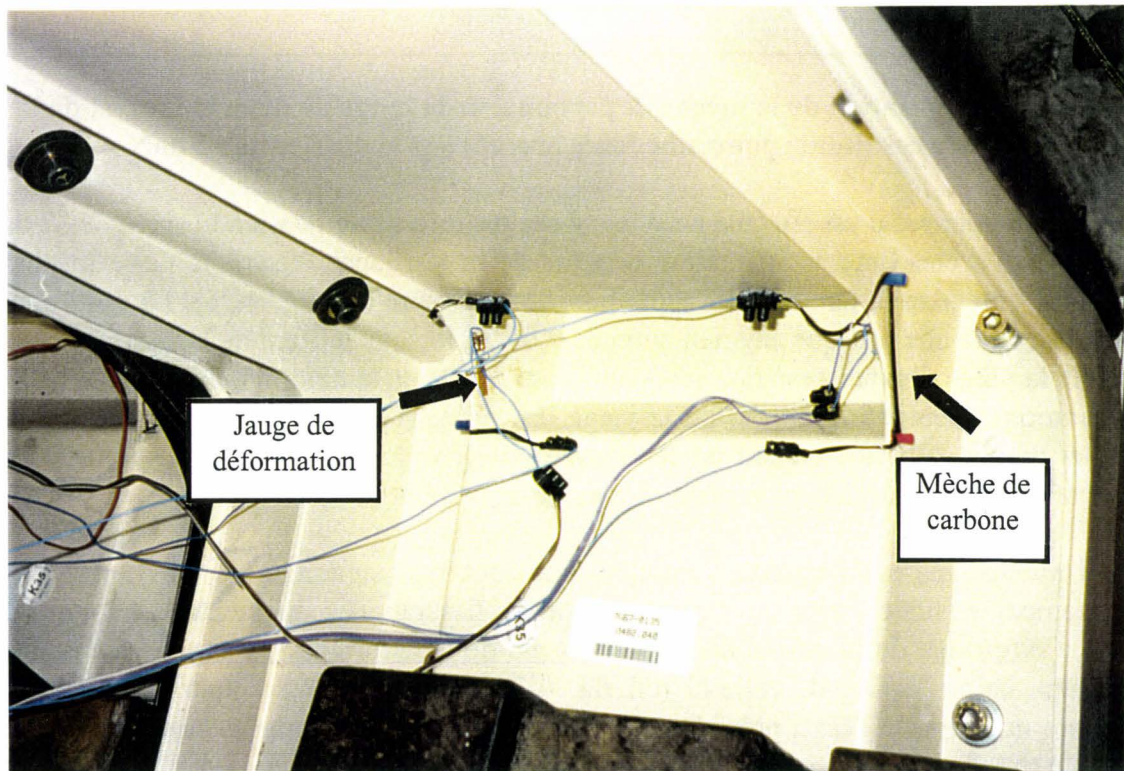
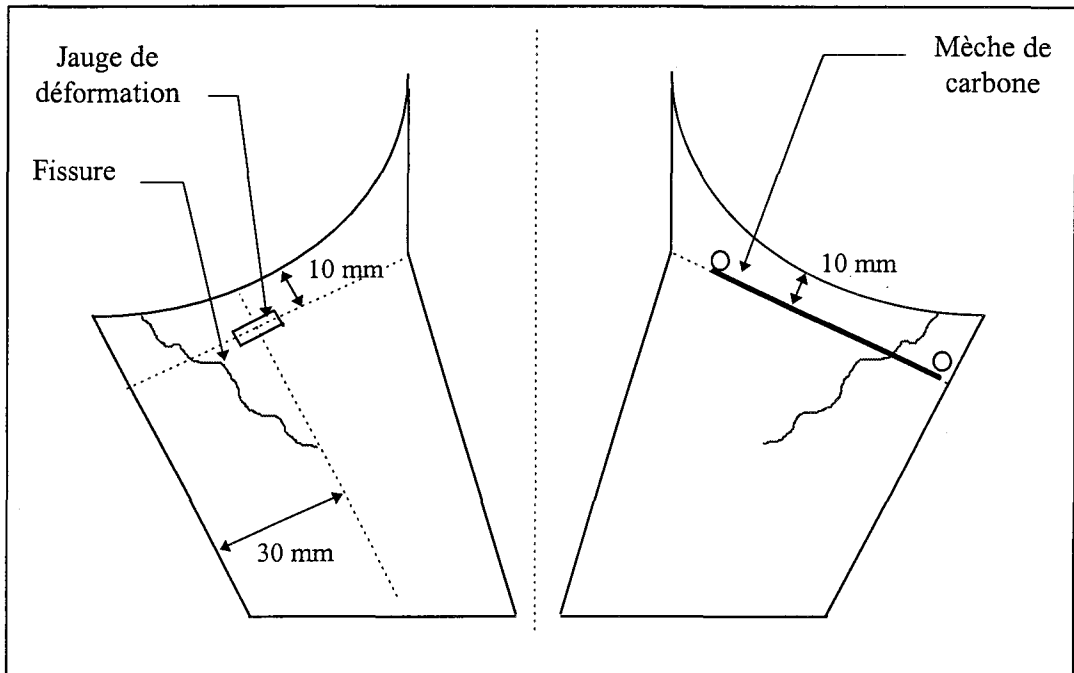


Photo. 5 : Instrumentation des pièces de renfort interne du siège (jauge de déformation et mèches de carbone)

### 4.3.2.2. Résultats

Une jauge de déformation est ici collée sur une face du renfort interne du siège, alors que sur l'autre face est placée la mèche de carbone servant de capteur d'endommagement. Les deux capteurs sont situés à 10 mm du bord supérieur de la pièce et perpendiculairement au bord gauche de celle-ci. La jauge de déformation est placée à 30 mm du bord gauche de la pièce pour éviter une rupture de la jauge d'extensométrie lors de la fissuration.



**Fig 4-25 : Localisation de la mèche de carbone, de la jauge de déformation et de la fissure résultante pour une force exercée sur le dossier de 32 daN**

Un premier essai est effectué avec une force exercée sur le dossier du siège de 32 daN. Après 35 000 cycles, une augmentation brusque de la résistance électrique de la mèche de carbone est enregistrée, témoin de l'apparition d'une fissure (cf. fig. 4-26). La déformation mesurée présente une brusque augmentation de 0,01 %, lorsque le front de la fissure arrive au niveau de la jauge d'extensométrie, puis une baisse rapide de la déformation, dès que le front de fissuration a dépassé le niveau de la jauge. En effet, la jauge d'extensométrie est alors beaucoup moins sollicitée du fait de la discontinuité créée par la fissuration entre la zone d'application de la contrainte et le point de mesure de la déformation.

Un deuxième essai effectué à un niveau de contrainte supérieur (37 daN), présente un comportement similaire, lors de l'apparition de la fissuration : augmentation forte de la résistance électrique de la mèche de carbone et pic de la déformation mesurée par la jauge, suivi d'une baisse rapide de celle-ci (cf. fig. 4-27). L'amplitude de contrainte étant plus importante que lors de l'essai précédent, la fissuration intervient pour un nombre de cycles plus faible (6 000 cycles).

Dans les deux cas, une résistance électrique minimale d'amplitude conséquente est présente. Celle-ci correspond à la réponse du capteur d'endommagement lorsque la contrainte est relâchée.

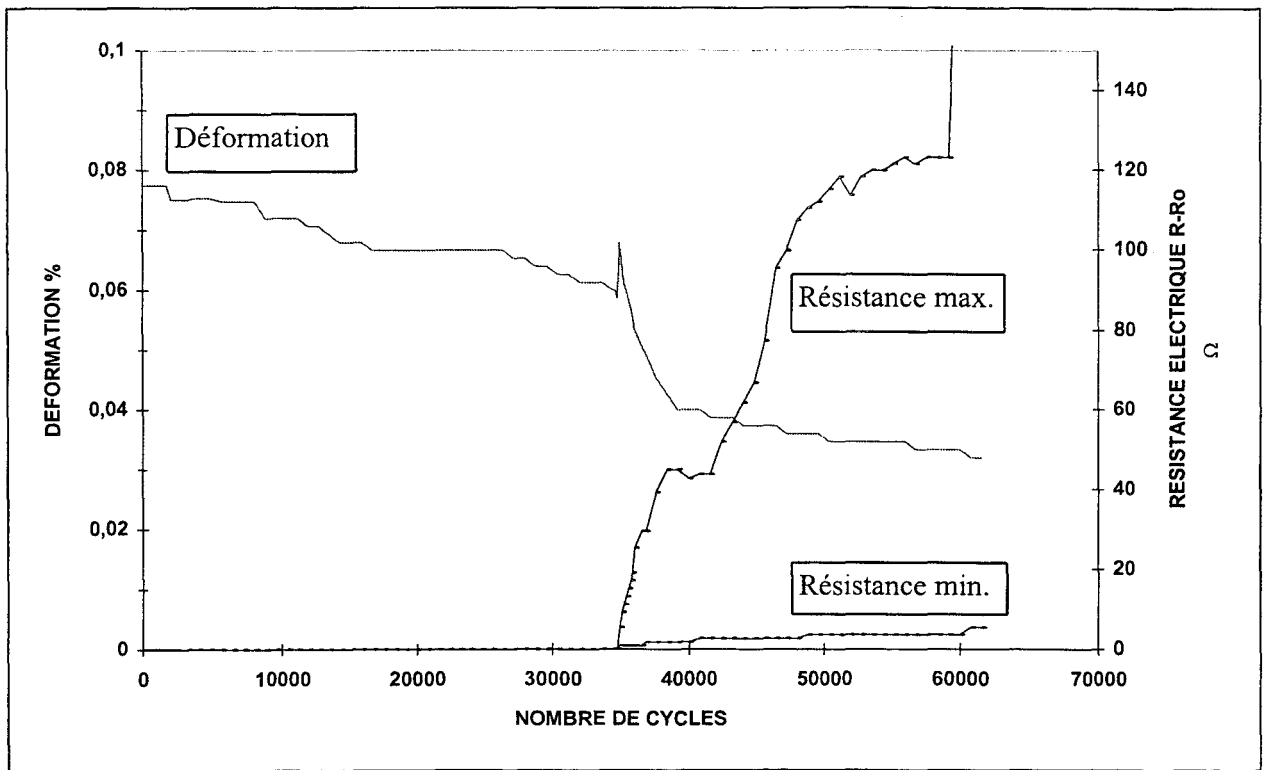


Fig. 4-26 : Essai n°1 de fatigue sur siège ( Force exercée sur le dossier de 32 daN)

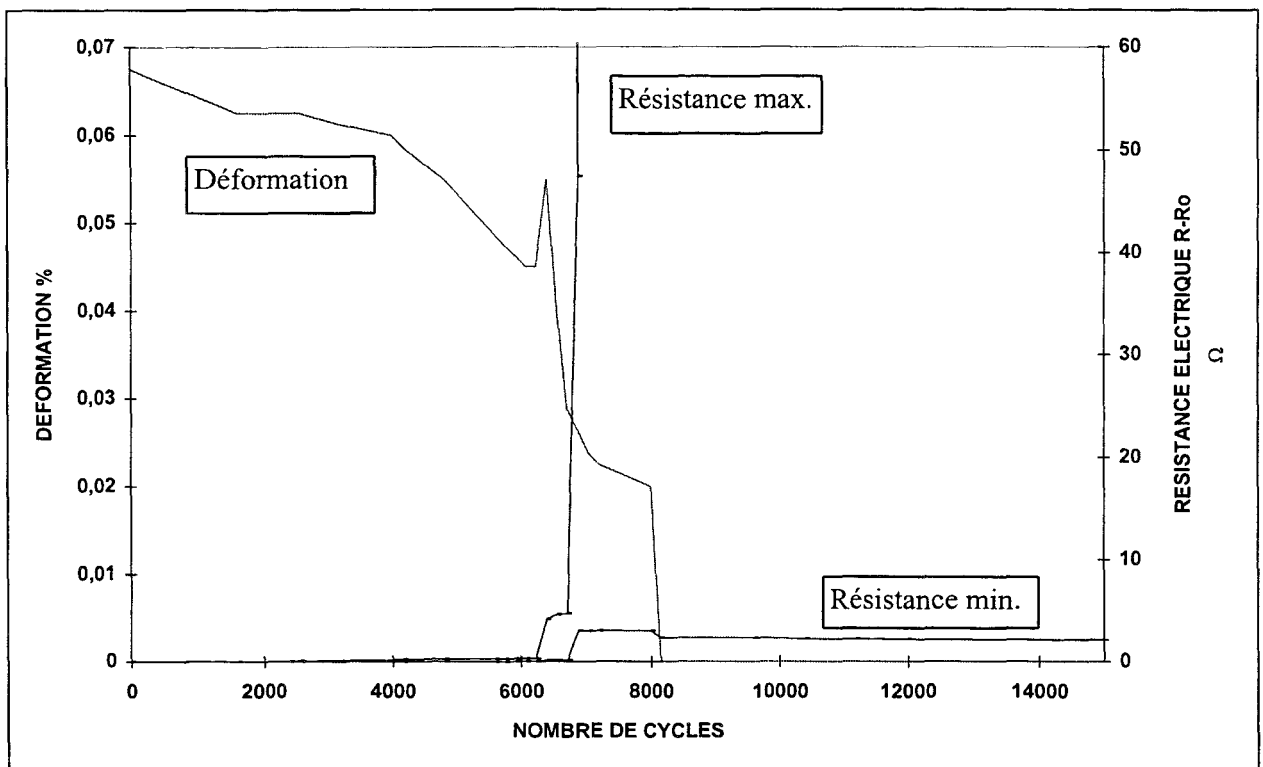
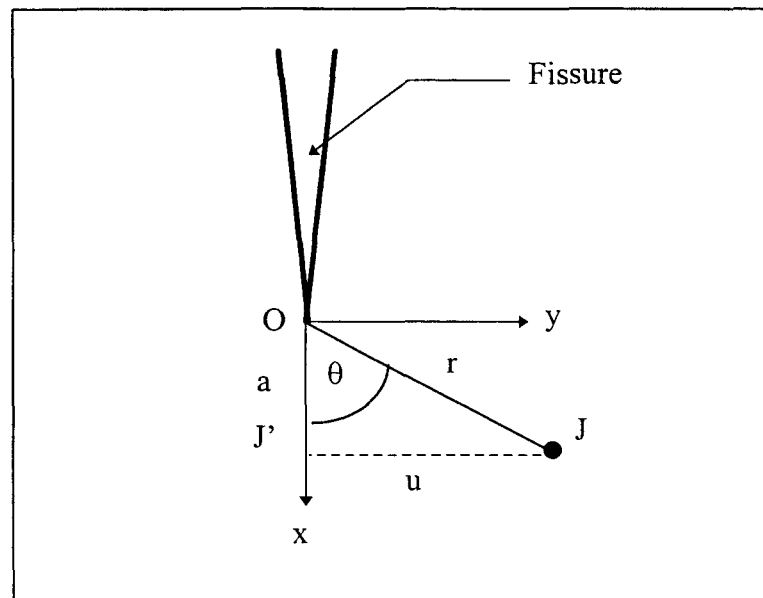


Fig. 4-27 : Essai n°2 de fatigue sur siège ( Force exercée sur le dossier de 37 daN)

### 4.3.2.3. Interprétation de la discontinuité de déformation au niveau de la jauge lors de l'apparition de la fissure

L'application de la mécanique de la rupture permet d'expliquer l'évolution de la déformation lors de l'amorçage et de la propagation de la fissure moyennant un certain nombre de simplifications et d'hypothèses :

- Le matériau est considéré comme isotrope et homogène de module E.
- Le matériau présente un comportement élastique linéaire.
- La direction de la déformation calculée est celle mesurée par la jauge suivant Oy, perpendiculairement à l'axe de propagation de la fissure suivant Ox (cf. fig. 4-28).



**Fig. 4-28 : Notation adoptée pour une fissuration plane**

- On suppose que la contrainte de sollicitation imposée induit pour la pièce considérée un état de déformations planes. Cette hypothèse s'applique notamment pour les plaques épaisses (plaque à forte épaisseur relative) [62]. La pièce de renfort interne étudié peut être assimilée à ce type de pièce, son épaisseur étant quatre fois plus faible que ses deux autres dimensions. Les tenseurs des contraintes et des déformations s'écrivent donc :

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \quad \text{et} \quad \varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4-15)$$

- L'amorçage et la propagation de fissure s'effectuent en mode I. Le déplacement provoqué par la fissure se situe uniquement suivant Oy et s'apparente au déplacement produit par une dislocation rectiligne coin parallèle au front de la fissure et dont le vecteur de Burgers est parallèle à Oy.

La mécanique de la rupture permet de déterminer le champ de contrainte induite par la fissure (cf. § Annexe I) :

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4-16)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4-17)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4-18)$$

Dans le cas présent la jauge de déformation située au point J se trouve à une distance normale de l'axe de propagation de la fissure u.

On a alors :  $\frac{1}{r} = \frac{u}{\sin \theta}$  et  $a = \frac{u}{\tan \theta}$

avec a projection de r sur l'axe Ox et u = constante

Les expressions de  $\sigma_{xy}$  et  $\sigma_{yy}$  peuvent se réécrire suivant le seul paramètre variable  $\theta$ .

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \pi u}} \sqrt{\sin \theta} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4-19)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \pi u}} \sqrt{\sin \theta} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4-20)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \pi u}} \sqrt{\sin \theta} \cos \frac{\theta}{2} \left( \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4-21)$$

La déformation donnée par la jauge correspond à la déformation suivant Oy au point J. Elle correspond à une déformation locale ne tenant pas compte de la déformation engendrée par la fissure. Il est donc possible d'appliquer la loi de Hooke.

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_{xy} + \sigma_{yy}) \quad (4-22)$$

d'après les équations (4-20), (4-21) et (4-22) :

$$\varepsilon_y = \frac{K_I}{\sqrt{2 \pi u}} \sqrt{\sin \theta} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + 2 \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (4-23)$$

En fonction du paramètre  $a$ , la déformation s'écrit :

$$\varepsilon_y = \frac{K_I}{\sqrt{2 \pi u}} \sqrt{\sin(\text{Arctan}(u/a))} \cos \frac{(\text{Arctan}(u/a))}{2} \left( 1 + 2 \sin \frac{(\text{Arctan}(u/a))}{2} \sin \frac{3(\text{Arctan}(u/a))}{2} \right) \quad (4-24)$$

L'étude de la fonction (4-23) montre qu'elle est croissante lorsque  $\theta$  varie entre  $0$  et  $70^\circ$ , puis décroissante lorsque  $\theta$  varie de  $70^\circ$  à  $180^\circ$  (cf. fig. 4-29 a). L'allure de la courbe théorique, donnée par l'équation (4-24) de la déformation en fonction de la distance  $a$ , qui diminue avec la propagation de la fissure, est identique à celle des courbes expérimentales (cf. fig 4-29 b). Cela permet d'expliquer l'augmentation brutale puis la chute immédiate de la déformation, lorsque la fissure passe à proximité, puis dépasse la jauge de déformation. (La distance  $u$  est prise pour la courbe théorique à  $5 \text{ mm}$ , la valeur expérimentale trouvée lors de l'essai n°1.)

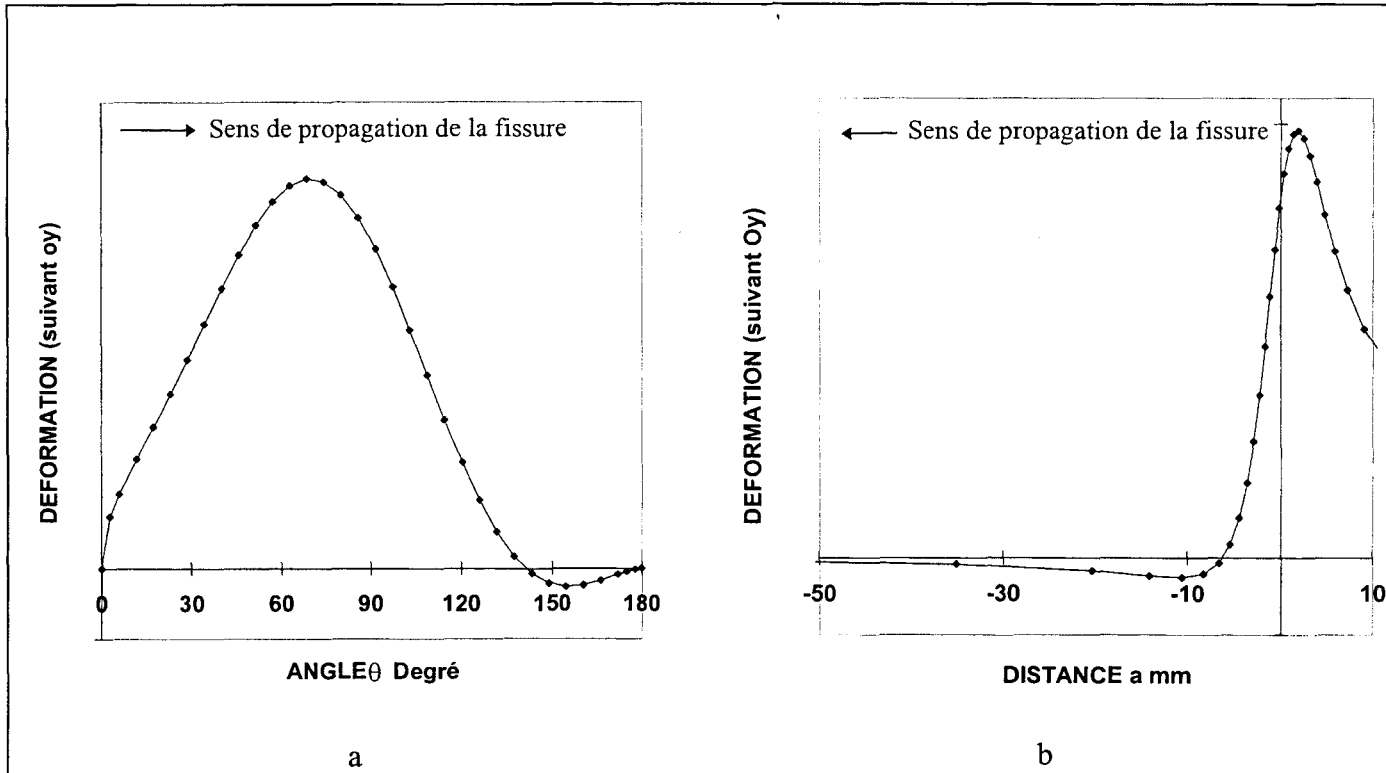


Fig. 4-29 : Courbes théoriques de la déformation suivant Oy



#### 4.3.2.4. Bilan des essais sur sièges

Ces essais ont permis de démontrer l'intérêt des capteurs résistifs développés appliqués à des pièces industrielles complexes. La mèche de carbone permet en effet de connaître exactement l'instant auquel apparaît la première fissure de la pièce considérée, avec une réponse beaucoup plus facilement exploitable que celle de la jauge de déformation associée. Notamment un retour de l'information délivrée par le capteur peut facilement être mis en place, afin dans le cas présent, d'arrêter l'essai de fatigue dès que la mèche de carbone est rompue. La mèche de carbone a montré aussi sa supériorité par rapport aux jauges de fissuration classiques (de dimension inférieure au cm) utilisées auparavant sans succès, les fissurations se propageant à côté des jauges dans la majorité des cas. Le caractère linéaire du capteur résistif développé (longueur conséquente de la mèche de carbone) permet de s'affranchir du caractère aléatoire du point d'amorçage de la fissuration en plaçant la fibre sur toute la longueur de la pièce perpendiculairement à la direction de fissuration observée.

Le capteur développé peut donc aussi servir à détecter avec précision la durée de vie de pièces prototypes dans les conditions de chargement précisées par le cahier des charges d'utilisation, afin de vérifier ainsi la conformité de la pièce. Il faut pour cela, observer sur une première série de pièces prototypes le type d'endommagement induit, afin d'être en mesure de placer les capteurs de façon optimale sur une deuxième série de pièces.

## **CONCLUSION ET PERSPECTIVES**



## CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'étude menée s'inscrit dans l'optique du développement d'une structure composite capable d'autocontrôler son niveau d'endommagement en cours d'utilisation, par l'implantation de capteurs en son sein dès sa phase de conception.

Une analyse bibliographique a permis d'identifier différents types de capteurs utilisables (fibres optiques, piézocéramiques,...) et a orienté notre choix sur un composite verre/résine instrumenté avec des mèches de carbone servant de capteurs résistifs, les éventuelles elongations et ruptures des fibres composant la mèche de carbone intégrée se traduisant par une augmentation de sa résistance électrique.

Les mèches de carbone à travers leur propre déformation ou leur propre endommagement donnent une image unidirectionnelle (via leur réponse électrique) des déformations subies par la structure hôte dans laquelle elles sont intégrées. Pour établir une corrélation entre la réponse électrique de la mèche de carbone servant de capteur et l'endommagement du matériau hôte, il convient de déterminer préalablement, par des essais mécaniques ou des calculs de structure, le niveau de déformation correspondant à l'endommagement critique du matériau hôte à mettre en évidence. Ensuite, il faut choisir une mèche de carbone appropriée afin d'obtenir une réponse électrique du capteur facilement identifiable et reproductible (par exemple augmentation de résistance électrique due aux premières ruptures de fibres de carbone) pour la déformation d'endommagement critique de la structure à contrôler.

La première partie de l'étude sur éprouvettes a permis de caractériser les réponses électriques de mèches de carbone de nature différente. Les essais de base en traction monoaxiale ont ainsi montré que la sensibilité du capteur à la déformation exercée dépend des caractéristiques physiques de la mèche de carbone utilisée telles que son allongement à la rupture ou son nombre de filaments. Par ailleurs, la reproductibilité des réponses électriques des capteurs, ainsi que l'absence de dégradation des propriétés mécaniques du matériau hôte consécutif à l'intégration des capteurs ont été mises en évidence.

L'augmentation de résistance électrique du capteur peut être due à deux phénomènes. D'une part l'elongation des fibres de carbone, dans ce cas, c'est le nombre de filaments des mèches de carbone qui influe principalement sur la réponse électrique de la mèche de carbone. D'autre part, la rupture des fibres de carbone, c'est alors leur allongement et leur spectre de distribution en rupture qui gouverne la réponse du capteur. La réponse électrique provenant des ruptures des fibres de carbone est néanmoins la plus simple à exploiter car d'amplitude beaucoup plus élevée que celle induite par l'elongation des fibres de carbone.

L'étude de base en traction a ensuite été complétée pour d'autres modes de sollicitations (flexion, cisaillement, chargement répété progressif, fatigue...). Les capteurs résistifs réagissent pour toutes ces sollicitations mécaniques avec des réponses électriques différentes suivant la sollicitation imposée. Pour pouvoir instrumenter une structure de façon optimale, il convient donc de connaître le type de sollicitation auquel elle sera soumise.

Par ailleurs les chargements dynamiques (chargement répété progressif et fatigue dynamique à déformation ou contrainte imposée) ont mis en évidence l'existence d'une résistance électrique résiduelle après suppression de la sollicitation appliquée. Le capteur développé ne se comporte donc pas comme un simple capteur de déformation instantanée mais est capable de mémoriser, par l'intermédiaire de sa résistance électrique résiduelle, les endommagements éventuels du matériau hôte. Une utilisation ponctuelle du capteur d'endommagement peut par conséquent être réalisée en mesurant sa résistance électrique résiduelle.

L'analyse des réponses électriques des capteurs obtenues lors des essais sur éprouvettes a permis de développer les procédures d'utilisation des capteurs. Ainsi, il apparaît que les capteurs étudiés peuvent être utilisés comme des capteurs indiquant qu'un seuil d'endommagement est dépassé (effet fusible) ou comme des capteurs donnant une image continue de l'endommagement de la structure sur une plage limitée de déformation. Pour le dernier type d'utilisation, afin d'optimiser la procédure, il convient de modéliser la réponse électrique des capteurs développés.

Cette modélisation a pour objectif de calculer directement à partir de la valeur de résistance électrique du capteur, le niveau de déformation de la structure. Elle est nécessaire au développement de codes de calculs destinés au suivi de l'endommagement en temps réel de la structure instrumentée. Si la modélisation est relativement simple dans le cas de l'élongation des fibres de carbone, en revanche elle demande dans le cas de la rupture des fibres l'utilisation de fonctions statistiques empiriques telles que des fonctions de Weibull ou des fonctions sigmoïdales.

Ensuite, l'application des capteurs sur des tubes (sollicités en pression interne croissante et fatigue dynamique) a permis de mettre en oeuvre la méthodologie d'instrumentation précédemment développée sur une pièce industrielle. Grâce à la caractérisation des réponses électriques des mèches de carbone réalisée sur éprouvettes et à la connaissance des lois de comportement mécaniques des tubes nous avons choisi les mèches de carbone les plus appropriées ainsi que leurs emplacements. Une modélisation de la réponse électrique de la mèche de carbone a ensuite permis de déterminer le niveau de premier endommagement de la structure contrôlée simplement à partir de la réponse électrique du capteur. Nous avons donc validé l'utilisation de mèches de carbone comme capteurs résistifs d'endommagement pour une pièce industrielle simple (tube) soumise à une sollicitation biaxiale (chargement en pression interne). Une application industrielle pour la réalisation d'un système de contrôle préventif en temps réel de structures sous pression (tubes ou réservoirs) est dès à présent envisageable, après développement des procédés d'intégration des capteurs au sein de pièces composites en production industrielle.

Afin de compléter notre étude, plusieurs axes de recherche méritent encore d'être développés comme l'étude des réponses électriques des capteurs sous d'autres modes de sollicitations (chargement en compression, chocs...) et sous chargement complexe et aléatoire, ainsi que l'utilisation des capteurs développés pour des composites carbone.

Pour les phénomènes de chocs, la réalisation de pièces composite quadrillées par des réseaux de mèches de carbone permettrait de localiser précisément les éventuels

endommagements locaux situés aux intersections des mèches de carbone rompues, afin d'obtenir une cartographie de l'état d'endommagement du matériau.

En outre, il serait intéressant de préciser les informations fournies par le capteur, notamment en terme de résistance électrique résiduelle, sous chargement complexe et aléatoire. En effet en conditions réelles d'utilisation, la plupart des pièces industrielles à instrumenter sont soumises à de telles conditions de chargement.

Par ailleurs la vérification de l'utilisation de la technique de suivi de l'augmentation de la résistance électrique due à la rupture des mèches de carbone pour des composites à renfort carbone pourrait être effectuée, le caractère conducteur des fibres de renfort ne devant pas a priori perturber de façon perceptible la réponse électrique du capteur. Cela permettrait d'élargir le champ d'utilisation du capteur développé aux pièces en renforts carbone qui constituent l'essentiel des pièces composite de haute technologie, notamment dans l'aéronautique secteur pour lequel un suivi en continu de l'intégrité des pièces composites serait appréciable.

Dans l'état actuel, les principales applications envisagées du système de suivi d'endommagement développé concernent les pièces composites structurales nécessitant un contrôle sévère de leur intégrité durant leur phase d'utilisation, comme les pales d'éolienne, les réservoirs sous pression, les canalisations de centrales nucléaires ou les pièces aéronautiques.

---

# ANNEXES

# ANNEXE 1

## Mécanique de la rupture

### A.1 Principe et intérêt de la mécanique de la rupture

L'analyse de l'endommagement des structures peut faire appel à la théorie de la mécanique de la rupture qui prend en compte la présence de défauts (vides, cavités, fissures, inclusions, ...) contrairement aux calculs habituels de la mécanique des milieux continus (théorie de l'élasticité, résistance des matériaux), et permet ainsi d'analyser les propriétés d'amorçage et de propagation de fissures des matériaux en traction, flexion, choc ou fatigue. Initialement développée pour des matériaux métalliques, la théorie de la mécanique de la rupture s'est depuis révélée également adaptée à l'étude des défauts des composites à matrice organique, sous réserve de considérer a priori le matériau comme étant anisotrope mais globalement homogène, et de respecter certaines conditions et hypothèses:

- L'orientation du défaut par rapport aux axes principaux de symétrie du matériau doit être fixée et coïncider avec les directions principales de symétrie des contraintes appliquées.
- La fissure doit se propager dans le plan et selon l'orientation du défaut initial.
- La nature de la sollicitation doit être connue (modes I, II, ou III)

L'intérêt de la mécanique de la rupture apparaît lorsque l'on rappelle que la rupture est un mode de défaillance gouverné par la fissuration : Pour qu'une rupture se produise, il est nécessaire qu'une fissure soit créée, amorcée puis finalement propagée. Or les discontinuités élastiques que sont les fissures ont des origines multiples internes ou externes au matériau, résultant d'une conception impropre, d'une mise en oeuvre imparfaitement maîtrisée ou d'une utilisation abusive. Comprendre voire éviter les ruptures en utilisant des critères de conception adéquats revient ainsi à analyser finement les caractéristiques d'amorçage et de propagation de fissure des matériaux.

Ceci constitue précisément le champ d'action de la mécanique de la rupture qui permet de caractériser la ténacité des matériaux via la détermination sur éprouvettes entaillées de véritables caractéristiques intrinsèques, indépendantes de la géométrie de l'éprouvette et de la charge appliquée. Suivant le niveau de ductilité du matériau, le comportement à la rupture est analysé à l'aide des concepts de :

- la mécanique linéaire-élastique de la rupture (Linear Elastic Fracture Mechanics ou LEFM), qui comme son nom l'indique ne peut être appliquée qu'aux matériaux présentant un comportement parfaitement linéaire, élastique et fragile;
- la mécanique élasto-plastique de la rupture (Post Yield Fracture Mechanics ou PYFM), qui tente de prendre en considération le cas des matériaux ductiles auxquels la LEFM ne s'applique pas.

Suivant le cas, la notion de ténacité (encore appelée résistance à la fissuration) est ainsi représentée par:

- le taux critique de restitution d'énergie  $G$  ou le facteur d'intensité de contrainte critique  $K$  de la LEFM, ou par
- l'intégrale de contour  $J$  (ou intégrale de Rice) ou la courbe de résistance à la fissuration (dite courbe  $R$ ) de la PLYFM, les courbes  $R$  donnant en fait la variation de la ténacité ( $G$ ,  $K$  ou  $J$ ) en fonction de l'avancée de fissure.

Trois modes de sollicitation sont habituellement distingués, qui correspondent en pratique à trois modes de rupture différents :

- Mode 1 (clivage) : les surfaces de la fissure se déplacent perpendiculairement l'une à l'autre
- Mode 2 (cisaillement plan) : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de fissure.
- Mode 3 (cisaillement antiplan) : les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et parallèlement au front de fissure.

Dans l'état actuel des choses, la grande majorité des travaux est consacrée au mode I, le plus pénalisant. Dans le cas de composites à renforts continus et résine thermodurcissable, les concepts de la LEFM sont généralement applicables, compte-tenu du caractère fragile de ce type de matériaux.

## A.2 Approche énergétique en régime élastique linéaire

Griffith fut le premier à proposer une théorie fondée sur la compétition entre l'énergie élastique restituée lors de l'avancée de la fissure et l'énergie dissipée sous forme de création de nouvelles surfaces. De façon générale, on appelle  $P$  l'énergie potentielle stockée dans la structure et  $\delta A$  désigne l'incrément de surface correspondant à l'extension de la fissure.  $G$  la force d'extension de la fissure ou encore le taux de restitution d'énergie élastique est défini par :

$$G = - \frac{\partial P}{\partial A} \quad (\text{A-1})$$

Considérons le système constitué par la pièce fissurée et les forces qui lui sont appliquées, l'énergie totale de ce système est donnée par :

$$U_t = U_f + U_e + U_s + U_c \quad (\text{A-2})$$

- $U_t$  : énergie totale
- $U_f$  : énergie potentielle des forces appliquées
- $U_e$  : énergie élastique emmagasinée
- $U_s$  : énergie de surface
- $U_c$  : énergie cinétique éventuelle

$$\text{avec } U_s = (S + 2A) \gamma_s \quad (\text{A-3})$$

- $A$  : surface d'une lèvres de la fissure
- $S$  : surface externe
- $\gamma_s$  : force à fournir au système par unité de longueur pour qu'il y ait

augmentation de la surface libre d'une unité

Le système considéré est un système fermé n'échangeant ni chaleur, ni travail avec l'extérieur, d'après le premier principe de la thermodynamique, énergie de ce système reste constant :

$$dU_f + dU_e + d(S + 2A) \gamma_s + dU_c = 0 \quad (\text{A-4})$$

En considérant que  $dS = 0$ , que l'on est à l'équilibre ( $dU_c = 0$ ) et en introduisant  $dP = dU_f + dU_e$  La relation précédente devient :

$$dP + 2 \gamma_s dA = 0$$

d'où

$$G_c = 2 \gamma_s \quad (\text{A-5})$$

Il y a propagation de la fracture si  $G$  dépasse le seuil critique  $G_c$ .

Par ailleurs le taux de restitution d'énergie élastique  $G$  peut être relié à la complaisance  $C$  de la structure.

En effet, soit  $v$  le déplacement du point d'application des forces extérieures  $F$  :

$$dU_f = -Fdv \quad \text{et} \quad dU_e = 1/2 d(Fv)$$

d'où

$$dP = dU_f + dU_e = 1/2 (vdF - Fdv)$$

En introduisant :  $C = \frac{v}{F}$  on a  $dP = -\frac{1}{2} F^2 dC$

d'où

$$G = -\frac{\partial P}{\partial A} = \frac{1}{2} F^2 \frac{\partial C}{\partial A} \quad (\text{A-6})$$

### A.3 Approche mécanique

Nous nous plaçons dans le cas, le plus fréquent, de l'ouverture d'une fissure en mode I, présenté sur la figure A-1.

En se restreignant au régime élastique et à un problème à deux dimensions, les résultats des champs de contraintes et de déformations sont les suivants :

**Contrainte :**

$$\sigma_{xx} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (\text{A-7})$$

$$\sigma_{yy} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (\text{A-8})$$

$$\sigma_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (\text{A-9})$$

$$\sigma_{zz} = \nu (\sigma_{xx} + \sigma_{yy}) \quad (\text{en déformation plane})$$

$$\sigma_{zz} = 0 \quad (\text{en contrainte plane})$$

### Déformation :

$$u_x = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left( k - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (\text{A-10})$$

$$u_y = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left( k + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) \quad (\text{A-11})$$

avec  $k = 3 - 4\nu$  (en déformation plane)

$$k = \frac{3 - \nu}{1 - \nu} \quad (\text{en contrainte plane})$$

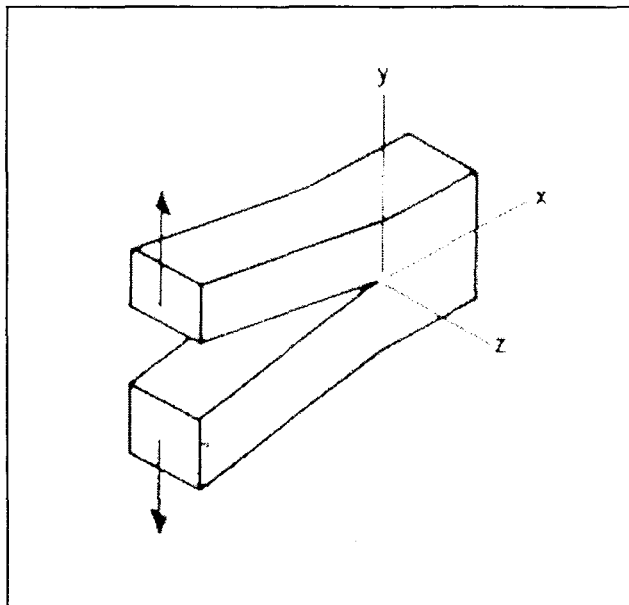
$r$  et  $\theta$  : coordonnées cylindriques dont l'origine du repère est la pointe de la fissure

$\mu$  : module de cisaillement

$K_I$  : facteur d'intensité de contrainte en mode I

$\nu$  : coefficient de Poisson

Les démonstrations de ces équations que nous ne détaillerons pas, sont données dans les ouvrages des références [63] et [64].



**Fig. A-1 : Ouverture d'une fissure en mode I**



En fait, la distribution géométrique des contraintes en tête d'une fissure effilée (rayon tendant vers zéro) est la même quel que soit le chargement en mode I, et leur intensité est proportionnelle à un facteur d'échelle  $K_I$  appelé facteur d'intensité de contrainte (exprimé en  $\text{Pa.m}^{1/2}$ ) et qui dépend de la géométrie de la fissure et de la contrainte globale appliquée (calculée en l'absence d'entaille) :

$$K_I^2 = \sigma^2 Y^2 a \quad (\text{A-12})$$

où  $Y$  est un facteur de correction géométrique tenant compte de la largeur finie de l'éprouvette,  $a$  la longueur de fissure et  $\sigma$  la contrainte globale appliquée. La LEFM postule que l'extension de la fissure se produit lorsque  $K_I$  atteint une valeur critique  $K_{Ic}$  qui est, comme  $G_{Ic}$ , une caractéristique intrinsèque du matériau.

## A.4 Relation entre ces deux approches

Nous considérons que le travail nécessaire à la création d'une fissure de longueur  $\delta a$  est égal à l'opposée de l'énergie potentielle. Le travail est donné par :

$$\delta w = \int_a^{a+\delta a} \sigma_{yy} u_y dx \cong \sigma_{yy} u_y \delta a \quad (\text{A-13})$$

$$\begin{aligned} \text{avec } u_y \text{ pris au point : } & r = x & \theta = \pi \\ \sigma_{yy} \text{ pris au point : } & r = \delta a - x & \theta = 0 \end{aligned}$$

D'après les équations (A-8) et (A-11), en se plaçant dans le cas d'une déformation plane :

$$dw = \frac{K_I}{\pi \mu} \left( \frac{x}{|\delta a - x|} \right)^{1/2} (1 - \nu) \delta a \quad (\text{A-14})$$

Quand  $\delta a$  tend vers 0 :

$$\delta w = \frac{K_I^2}{\pi \mu} (1 - \nu) \delta a = -dP$$

d'où

$$G = \frac{K_I^2}{\pi \mu} (1 - \nu) \quad (\text{A-15})$$

$$G = \frac{2 K_I^2}{\pi E} (1 - \nu^2) \quad (\text{A-16})$$

$$\text{Avec } E : \text{ module de Young : } \quad E = 2\mu (1 + \nu)$$

On montre ainsi que le facteur d'intensité de contrainte  $K_I$ , qui décrit la distribution des contraintes près de la fissure est directement lié au taux de restitution d'énergie élastique  $G$ . L'utilisation de l'une ou l'autre approche dépend de la configuration de chargement, sachant qu'il est parfois difficile d'enregistrer les variations de complaisance, ce qui rend malaisée la détermination de  $G$ . Une analyse des contraintes au sein des éprouvettes permet cependant de calculer  $K$  sans autre difficulté.

## ANNEXE 2

### Utilisation de la méthode des moindres carrés pour le calcul des coefficients des fonctions de modélisation

On prend ici l'exemple du calcul du coefficient  $\varepsilon_0$  de la fonction de Weibull pour les essais de traction sur éprouvettes.

La méthode des moindres carrés consiste à minimiser la somme des carrés des écarts entre les valeurs de déformation expérimentales  $\varepsilon_i$  et les valeurs de l'approximation théorique  $\tilde{\varepsilon}_i$ .

Soit la fonction  $\lambda$  :

$$\lambda = \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \tilde{\varepsilon}_i)^2 \quad (\text{A-17})$$

avec  $n$  le nombre de points utilisés et  $\tilde{\varepsilon}_i$  la déformation calculée selon une loi de Weibull :

$$\tilde{\varepsilon}_i = \varepsilon_0 \left[ \frac{\ln \left[ 1 - \left( \frac{\Delta R_i}{R_0 + \Delta R_i} \right) \right]}{L} \right]^{1/m} + \varepsilon_s \quad (\text{A-18})$$

En substituant  $\tilde{\varepsilon}_i$  par sa valeur calculée suivant une loi de Weibull l'équation (A-17) devient :

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \left[ \varepsilon_i - \varepsilon_0 \left[ \frac{\ln \left[ 1 - \left( \frac{\Delta R_i}{R_0 + \Delta R_i} \right) \right]}{L} \right]^{1/m} + \varepsilon_s \right]^2 = \sum_{i=1}^n \left[ \varepsilon_i - \left[ \varepsilon_0 \left( -\frac{\ln u_i}{L} \right)^{1/m} + \varepsilon_s \right] \right]^2 \quad (\text{A-19})$$

Pour trouver l'extremum de la fonction  $\lambda$ , il faut que sa dérivée s'annule ( $m$  est supposé connu, donné par la littérature) :

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \varepsilon_0} = \sum_{i=1}^n -2 \left( -\frac{\ln u_i}{L} \right)^{1/m} \left[ \varepsilon_i - \left[ \varepsilon_0 \left( -\frac{\ln u_i}{L} \right)^{1/m} + \varepsilon_s \right] \right] = 0 \quad (\text{A-20})$$

A partir de l'équation précédente, il est facile de calculer la valeur de  $\varepsilon_0$  :

$$\varepsilon_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \left( -\frac{\ln u_i}{L} \right)^{1/m} \varepsilon_i \right] - \varepsilon_s \sum_{i=1}^n \left( -\frac{\ln u_i}{L} \right)^{1/m}}{\sum_{i=1}^n \left( -\frac{\ln u_i}{L} \right)^{2/m}} \quad (\text{A-21})$$

La valeur de  $\varepsilon_0$  trouvée à partir de l'équation (A-21) pour des valeurs de résistance comprises entre 1,5 et 16  $\Omega$  est de 0,185.

Le calcul de la dérivée seconde de la fonction  $\lambda$  permet de vérifier que la valeur  $\varepsilon_0$  trouvée correspond bien au minimum de la fonction  $\lambda$ .

$$\frac{\partial^2 \lambda}{\partial^2 \varepsilon_0} = \sum_{i=1}^n 2 \left( -\frac{\ln u_i}{L} \right)^{2/m} \quad (\text{A-22})$$

$$u_i < 1 \text{ donc } -\ln u_i > 0 \text{ et } \frac{\partial^2 \lambda}{\partial^2 \varepsilon_0} > 0$$

La dérivée seconde de la fonction  $\lambda$  est positive donc la valeur  $\varepsilon_0$  calculée est donc bien celle qui permet de minimiser la fonction  $\lambda$ .

**REFERENCES  
BIBLIOGRAPHIQUES**

**REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

- 1 : R. S. Sandhy, "Non linear response of unidirectionnal and angle ply laminates", J. Aircraft, Vol. 13, 104-111, 1977
- 2 : P. Surmely, "La fibre optique : Technologie et application", Masson, Paris, 1995
- 3 : T. Fukuda, "Non destructive testing and smart composite materials", Matériaux & Techniques, Spécial Hors série : Matériaux composites avancés, 29-33, 1994
- 4 : R. M. Measures, "Fiber optic smart structures program at UTIAS", SPIE Fiber optic smart structures and skins II, Vol. 1170, 92-108, 1989
- 5 : S. Kitade, T. Fukuda, K. Osaka, "Detection of delaminations in graphite-epoxy composites with embedded optical fibers", Proc. 3<sup>rd</sup> Japan International SAMPE Symposium, Dec. 7-10, 1993
- 6 : B. Hofer, "Fibre optic damage detection in composite structures", Composites, Vol. 18, 4, 309-316, 1987
- 7 : R. M. Measures, "Fiber optic smart structures, structures that see the light", SPIE Optical testing and metrology III, Vol 1332, 377-398, 1990
- 8 : C. D. Butter and G. P. Hocker, "Fiber optic strain gauge", Applied optics, Vol. 17, 2867-2869, 1978
- 9 : W. Jeffrey Rowe, E. O. Rausch and P. D. Dean, "Embedded optical fiber strain sensor for composite structure applications", SPIE Fiber optic and laser sensors IV, Vol. 718, 266-273, 1986
- 10 : J. P. Perez, "Optique géométrique et ondulatoire", 2<sup>ème</sup> Edition, Masson, Paris, 1988
- 11 : T. Valis, E. Tapanes, K. Liu and R. M. Measures, "Passive-quadrature demodulated localised-Michelson fiber-optic strain sensor embedded in composite materials", Journal of lightwave Technology, Vol. 9, 4, 535-544, 1991
- 12 : E. Tapanes, "Real-time integrity monitoring using a passive quadrature demodulated, localised Michelson optical fibre interferometer capable of simultaneous strain and acoustic emission sensing", SPIE Fiber optic smart structures and skins IV, Vol. 1588, 356-367, 1991
- 13 : M. Lequime, P. Sansonetti, "Mesure de contraintes et de vibrations par fibres optiques", Bertin & Cie, 1990

- 14 : K. Liu, S. M. Ferguson, K. McEwen, E. Tapanes and R. M. Measures, "Acoustic emission detection for composite damage assessment using embedded ordinary single mode fiber optic interferometric sensors", SPIE Fiber optic smart structures and skins III, Vol. 1370, 316-323, 1990
- 15 : C. E. Lee, H. F. Taylors, A. M. Markus and E. Udd, "Optical fiber Fabry-Perot embedded sensors", Opt. Lett., Vol. 14, 1225-1227, 1989
- 16 : D. Sun, M. K. Burford and R. O. Claus, "Characterization of actuator-based materials using optical fiber sensors", SPIE, Vol. 2441, 291-295, 1995
- 17 : G. P. Carman and M. Mitrovic, "Health monitoring techniques for composite materials employing thermal parameters and fiber optic sensors", SPIE, Vol. 2191, 244-256, 1994
- 18 : T. Valis, D. Hogg, R. M. Measures, "Fiber optic Fabry-Perot strain gauge", IEEE Photonics Technology letters, Vol. 2, 3, 227-228, 1990
- 19 : A. M. Vengsarkar, W. C. Michie, L. Jankovic, B. Culshaw, R. O. Claus, "Fiber optic sensor for simultaneous measurement of strain and temperature", SPIE Fiber and laser sensors VII, Vol. 1367, 249-260, 1990
- 20 : B. Y. Kim, J. N. Blake, S. Y. Huang and H. J. Shaw, "Use of highly elliptical core fibers for two mode fiber devices", Opt. Lett., Vol. 12, 729-735, 1987
- 21 : C. G. Gackstatter and T. A. Story, "Smart structure manufacturing methods", Matériaux & Techniques, Spécial composites avancés, 13-17, 1994
- 22 : W. W. Morey, G. Meltz, W. H. Glenn, "Bragg-grating temperature and strain sensors", Springer proceeding in physics, Vol. 44, 526-531, 1989
- 23 : H. D. Simonsen, R. Paetsch, J. R. Dunphy, "Fiber Bragg grating sensor demonstration in glass-fiber reinforced polyester composite", 1<sup>st</sup> European Conf. on Smart Structures and Materials, 73-76, Glasgow, 1992
- 24 : P. Akhavan Leilabady, J. D. C. Jones, D. A. Jackson, "Interferometric strain measurement using optical fiber", SPIE Fiber optical sensors, Vol 586, 230-237, 1985
- 25 : N. Fürstenau, W. Schmidt and H. C. Goetting, "Simultaneous interferometric and polarimetric strain measurements on composites using a fiber optic strain gauge", Applied Optics, Vol. 31, 16, 2987-2993, 1992
- 26 : H. Giovannini, "Matériaux composites intelligents contenant des réseaux de capteurs à fibres optiques pour un autodiagnostic permanent", Science Technique Technologie, 17, 24-29, 1991
- 27 : J. S. Sirkis, C. C. Chang, "Low velocity impact of optical fiber embedded laminated graphite / epoxy panels. Part II : Micro-scale", Journal of composite Materials, Vol. 28, 16, 1532-1552, 1994

- 28 : R. Czarnek, Y. F. Guo, K. D. Bennett and R. O. Claus, "Interferometric measurements of strain concentrations induced by an optical fiber embedded in fiber reinforced composite", SPIE Fiber optic smart structures and skins, Vol. 986, 43-53, 1988
- 29 C. DiFrancia, R. O. Claus, J. W. Hellgeth and T. C. Ward, "Discussion of pullout tests of polyimide-coated optical fibers embedded in neat resin", Proc. Conf. on optical fiber sensor based smart materials and structures, 70-82, April 3-4, Blackburg, Virginia, 1991
- 30 : J. R. Mannas and S. P. Joshi, "Study of smart sensing elements in a dynamic stress field", SPIE Smart sensing, processing and instrumentation, Vol. 1918, 264-275, 1993
- 31 : L. E. Cross, "Polarization controlled ferroelectric high strain actuators", Journal of intelligent material systems and structures, Vol. 2, 241-260, 1991
- 32 : M. A. Ealey and P. A. Davis, "Standard select electrostrictive lead magnesium niobate actuators for active and adaptative optical components", Optical engineering, Vol. 29, 11, 1373-1382, 1990
- 33 : E. F. Crawley, A. A. Bent, D. J. Warkentin, N. W. Hagood, "Recent progress in intelligent material systems", 9<sup>ème</sup> Journées Nationales sur les Composites, Saint-Etienne, Nov. 1994
- 34 : N. W. Hagood, R. Kindel, K. Ghandi and P. Gaudenzi, "Improving transverse actuation of ceramics using interdigitated surface electrodes", SPIE paper N° 1917-25, Proceeding of the 1993 North America Conference on Smart Structures and Materials, Albuquerque, NM, 1993
- 35 : G. H. Blackwood and M. A. Ealey, "Electrostrictive behavior in lead magnesium niobate (PMN) actuators, Part I : Materials perspective", Smart material structures, 2, 124-133, 1993
- 36 : C. H. Keilers, Jr and F. K. Chang, "Damage detections and diagnosis of composites using built-in piezoceramics", SPIE Smart structures and intelligent systems, Vol. 1917, 1009-1019, 1993
- 37 : J. Qiu, J. Tani and T. Takagi, "An intelligent piezoelectric composite material without bending deformation", Journal of technical physics, 35, 1-2, 99-107, 1994
- 38 : W. K. Chiu, S.C. Galea, "Damage monitoring in metallic and composite structures using piezoelectric thin film sensors", AR-008-342, Departement of defence, Australia, 1993
- 39: S. C. Galea, W. K. Chiu, J. J. Paul, "Use of piezoelectric films in detecting and monitoring damage in composites", Journal of intelligent material systems and structures, Vol. 4, 330-336, 1993



- 40 : A. A. Bent, N. W. Hagood, "Improved performance in piezoelectric fiber composites using interdigitated electrodes", SPIE, Vol. 2441, 196-212, 1995
- 41 : N. Shaikh, "Smart structural composites with piezoelectric micro-constituents", US Army Research Office, DAAL03-89-6-0086, 1992
- 42 : R. S. Porter, "Smart polymers. A brief review", *Plastics engineering*, 67-68, mai 1994
- 43 : F. El Moussali, J. J. Vullierme, "Transferts électriques et thermiques couplés dans un matériau composite carbone-verre époxy. Application à la réalisation d'un dégivreur de pale d'hélicoptère", *La recherche Aérospatiale*, 2, 57-65, 1993
- 44 : P. W. Chen, D. D. L. Chung, "Carbone-fiber-reinforced concrete as an intrinsically smart concrete for damage assessment during dynamic loading", *Journal of the American Ceramic Society*, 78, 816-818, 1995
- 45 : R. Prabhakaran, "Damage assessment through electrical resistance measurement in graphite fiber-reinforced composites", *Experimental Techniques*, Vol. 14, 16-20, 1990
- 46 : K. Schulte, Ch. Baron, "Load and failure analyses of CFRP laminates by means of electrical resistivity measurements", *Composites science and technology*, 36, 63-76, 1989
- 47 : Chr. Fischer, F. J. Arendts, "Electrical crack length measurement and the temperature dependence of the mode I fracture toughness of carbon fibre reinforced plastics", *Composites Science and technology*, Vol 46, 319-323, 1993
- 48 : O. Ceysson, M. Salviat, L. Vincent, "Suivi in-situ de l'évolution de divers endommagements dans des matériaux composites fibres longues de carbone/matrice polymère par mesure de résistance électrique", *Journées scientifiques et techniques : Micromécanique et mécanismes de l'endommagement des composites*, 30/31 mai, 1995
- 49 : N. Muto, H. Yanagida, T. Nakatsuji, M. Sugita, Y. Ohtsuka, Y. Arai, C. Saito, "Intelligent CFGFRP Composites with self-diagnostic function for preventing fatal fracture", *Sensors and materials*, Vol. 6, 1, 45-62, 1994
- 50 : F. Kishi, N. Takeda, O. Chen, W. Tredway, K. Prewo, "Acoustic emission characterization of the fracture mechanism of a high compliant, glass-matrix composite", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 40, 4/5, 791-799, 1991
- 51 : C.R.L. Murthy, M. R Bhat, "Fatigue damage stages in unidirectional glass-fibre-epoxy composites" : identification through acoustic emission technique, *International Journal on Fatigue*, Vol. 15, 5, 401-405, 1993
- 52 : M. L. Benzeggagh, X. L. Gong, A. Laksimi, D. Lai, "Analyse de l'endommagement dans une plaque trouée verre-époxyde soumise à un couple de torsion", 9<sup>ème</sup> Journées Nationales sur les Composites (JNC-9), St Etienne, 687-698, 1994

- 53 : P. Krawczak, J. Pabiot, "Application de l'émission acoustique à la caractérisation de l'interface fibre de verre/matrice organique thermodurcissable", *Composites*, 7, 6-13, 1995
- 54 : M. Peinado, A. Bonavent, A. Dumortier, C. François, R. Gambier, D. Menkes, "Le plastique armé, application au matériel tubulaire", Ed. Technip, Paris, 1986
- 55 : J. P. Pérez, R. Carles, R. Fleckinger, "Electromagnétisme vide et milieux matériels", Masson, Paris, 1991
- 56 : J. Komornicki, "Propriétés mécaniques des fibres de carbone : fonction de distribution des allongements à la rupture des monofilaments", *Composite*, 3, 225-235, 1988
- 57 : C. Baxevanakis, D. Jeulin, D. Valentin, "Fracture statistics of single-fibre composite specimens", *Composite Science and technology*, 48, 47-56, 1993
- 58 : M. Fuwa, A. R. Bunsell, B. Harris, "Tensile failure mechanisms in carbon fibre reinforced plastics", *Journal of materials science*, 10, 2062-2070, 1975
- 59 : M. Keyvani, M. François, D. Batiste, "Modélisation micromécanique du comportement endommagé de composite S.M.C.", *Compte rendus des 8<sup>ème</sup> Journées Nationales sur les Composites (JNC-8)*, 715-726, AMAC Paris, 1992
- 60 : J. Schiebisch, G. W. Ehrenstein, "Effect of adding particule and fiber recyclate to S.M.C. on mechanical properties and structure", 49<sup>th</sup> Annual Conf., *Composites Institue, The Society of the Plastics Industry, Inc.* Feb. 7-9, 1994
- 61 : M. L. Benzeggagh, S. Barre, B. Echalié, R. Jacquemet, "Etude de l'endommagement de matériaux composites à fibres courtes et à matrice thermoplastique", *Compte rendus des 8<sup>ème</sup> Journées Nationales sur les Composites (JNC-8)*, 703-713, AMAC Paris, 1992
- 62 : D. François, A. Pineau, A. Zaoui, "Comportement mécanique des matériaux, viscoplasticité, endommagement, mécanique de la rupture, mécanique de contact", Hermès, Paris, 1993
- 63 : H. D. Bui, "Mécanique de la rupture fragile", Masson, Paris, 1978
- 64 : H. Liebowitz, "Fracture. An advanced treatise", Academic Press, New-York & London, 1968

