



FR9603359

# Production d'énergie (hydraulique, thermique et nucléaire)

**ETUDE DES PERFORMANCES DU CONTROLE PAR  
EMISSION ACOUSTIQUE DE TUBES EN MATERIAUX  
COMPOSITES RESINE-FIBRE DE VERRE CONTENANT DES  
DEFAUTS**

***STUDY OF THE PERFORMANCES OF ACOUSTIC EMISSION  
TESTING FOR GLASS FIBRE REINFORCED PLASTIC PIPES  
CONTAINING DEFECTS***

EDF - - 96NB00111

**EDF**

**Direction des Etudes et Recherches**

**Electricité  
de France**

SERVICE RÉACTEURS NUCLÉAIRES ET ECHANGEURS  
Département Etude des Matériaux



Août 1995

VILLARD D.  
VIDAL M. C.

**ETUDE DES PERFORMANCES DU CONTROLE  
PAR EMISSION ACOUSTIQUE DE TUBES EN  
MATERIAUX COMPOSITES RESINE-FIBRE DE  
VERRE CONTENANT DES DEFAUTS**

***STUDY OF THE PERFORMANCES OF  
ACOUSTIC EMISSION TESTING FOR GLASS  
FIBRE REINFORCED PLASTIC PIPES  
CONTAINING DEFECTS***

Pages : 42

96NB00111

Diffusion : J.-M. Lecœuvre  
EDF-DER  
Service IPN. Département SID  
1, avenue du Général-de-Gaulle  
92141 Clamart Cedex

© Copyright EDF 1996

ISSN 1161-0611

## **SYNTHÈSE :**

Les tuyauteries en matériau plastique renforcé de fibres de verre, sont de plus en plus utilisées dans les installations de production d'électricité pour l'équipement ou le remplacement de circuits d'eau brute, classés "importants pour la sûreté".

On a entrepris d'évaluer les performances d'un contrôle par émission acoustique pour le contrôle en service de ce type de matériels. Les essais ont porté sur des tubes en matériaux composites verre-polyester et verre-vinylester sains, contenant des défauts de choc et des défauts intentionnels de fabrication. Ils ont été effectués par le CETIM, suivant la norme ASTM 1118, également connue sous le nom de code CARP, jusqu'à une pression maximale de 25 bar.

Ces essais ont montré que la procédure CARP permet de détecter les défauts et d'apprécier leur nocivité vis-à-vis du comportement en pression des tubes : dans la plupart des cas les tubes avec les défauts de choc étudiés, de faible nocivité, n'ont pas été distingués des tubes sains, par contre la gravité du défaut de manque d'imprégnation d'une nappe de roving est clairement apparue.

Des essais complémentaires d'endommagement ont été effectués sur des tubes mis en pression à des niveaux beaucoup plus élevés, pour lesquels l'endommagement conduit à une dégradation des caractéristiques élastiques globales du tube. Ils ont montré que l'émission acoustique et en particulier les critères utilisés par la procédure CARP sont susceptibles de donner de bonnes indications sur l'évaluation de l'endommagement. Il serait toutefois intéressant de poursuivre cette étude afin d'évaluer le comportement en émission acoustique de tubes ayant subi un endommagement dans les conditions de service.

## **EXECUTIVE SUMMARY :**

Glass fibre reinforced plastic pipes are more and more often used, in nuclear power plants, for building or replacement of water pipings classified "nuclear safety".

Tests have been performed to evaluate the performances of acoustic emission testing for in service inspection of these components. The tests were focused on glass fibre reinforced polyester and vinylester pipes, in as received conditions or containing impacts, and intentionally introduced defects. They have been carried out by CETIM, following the ASTM Standard E 1118 (code CARP), to a maximum pressure level of 25 bar.

The results show that the CARP procedure can be used for detection of defects and evaluation of their noxiousness towards internal pressure : most of the tubes containing low energy impacts could not be distinguished from tubes without defect ; on the other hand the important noxiousness of lacks of impregnation of roving layer appeared clearly.

Complementary tests have been performed on some tubes at a more important pressure level, for which the damage of the tubes is enough to deteriorate their elastic properties. The results showed that CARP procedure give valuable informations on damage level. It would be interesting to evaluate acoustic emission on tubes containing realistic in-service degradations.

## SOMMAIRE

	Page
1 - OBJET	11
2 - MATERIAUX ETUDIES	11
2.1 - Description des produits	11
2.2 - Description des défauts	13
3 - CONTROLE PAR EMISSION ACOUSTIQUE	16
3.1 - Rappel des principes de l'émission acoustique	16
3.2 - Le Code CARP (ASTM E 1118)	16
3.3 - Mode opératoire utilisé par le CETIM	16
4 - RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUIVANT LE CODE CARP	28
4.1 - Résultats obtenus sur les tubes sains	28
4.2 - Résultats obtenus sur les tubes avec défauts	30
4.3 - Analyse multidimensionnelle des données	30
5 - RÉSULTATS DES ESSAIS COMPLEMENTAIRES D'ÉVALUATION DE L'ENDOMMAGEMENT	31
5.1 - Description des essais de mise en pression jusqu'au perlage	31
5.2 - Résultats des mesures d'émission acoustique	31
5.3 - Résultats des mesures d'endommagement	34
5.4 - Corrélation des mesures d'émission acoustique et d'endommagement	34
6 - DISCUSSION	37
7 - CONCLUSIONS	38
REFERENCES	39
ANNEXE A :	40
RESULTATS DES ESSAIS DE QUALIFICATION SUIVANT LE CODE CARP	
ANNEXE B :	46
RESULTATS DES ESSAIS DE CORRELATION CODE CARP/ENDOMMAGEMENT	

**NEXT PAGE(S)  
left BLANK**

## 1 - OBJET

Les tuyauteries en matériau plastique renforcé de fibres de verre, sont de plus en plus utilisées dans les installations de production d'électricité pour l'équipement ou le remplacement de circuits d'eau brute, à température de service inférieure à 100°C et à une pression de l'ordre de 10 bar. Certains de ces circuits étant classés "importants pour la sûreté" (circuits d'incendie et circuits d'eau brute secourue par exemple), il apparaît nécessaire de disposer de méthodes de contrôle non destructif adaptées au contrôle en service de ce type de matériels.

Dans ce contexte, une étude a été menée, sous contrat, avec le CETIM, afin d'évaluer les performances d'un contrôle par émission acoustique effectué suivant la norme ASTM E 1118, également connue sous le nom de code CARP. Des essais ont été effectués sur des tubes sains, des tubes avec chocs, et des tubes comportant des défauts implantés volontairement, représentatifs de ceux qui pourraient apparaître en fabrication. Des essais complémentaires ont également été effectués pour étudier l'évolution des paramètres d'émission acoustique en fonction de l'endommagement par mise sous pression des tuyauteries en matériaux composites.

La présente note rend compte des résultats de ces essais .

Des examens visuels, des contrôles ultrasonores et par thermographie infrarouge ont déjà été effectués sur ces tubes ; ils ont fait l'objet des notes [1] et [2]. Une note de synthèse fera ultérieurement le bilan des méthodes applicables, en fabrication et en service, pour le contrôle non destructif des matériels en plastique armé de fibres de verre.

## 2 - MATERIAUX ETUDIÉS

### 2.1 - Description des produits

Cette étude a été réalisée sur des tubes voisins de ceux qui pourraient être utilisés pour le transport d'eau brute, à une température inférieure à 60°C et à une pression de service de l'ordre de 6 bar. Leur diamètre interne est de 100 mm, et ils sont fabriqués par enroulement filamentaire de fibres de verre, à partir des deux résines suivantes :

- la résine polyester bisphénolique ATLAC 382-05 AD de ICI (résine A),
- la résine vinylester DERAKANE 411-45 de DOW CHEMICAL (résine B).

Les caractéristiques principales de ces deux résines figurent dans le tableau I. Elles ont des comportements notablement différents : la résine vinylester B est beaucoup plus ductile (allongement à rupture en traction plus élevé) et est plus résistante en milieu humide que la résine polyester A.

Les tubes en résine A ont été mis en œuvre par la société SEPMA et les tubes en résine B, par la société CORD FRANCE ; leur structure de renfort est similaire : une couche anti-corrosion riche en résine et une partie mécanique composée de 8 à 10 couches de rovings de verre bobinés à  $\pm 55^\circ$  de l'axe du tube. La caractérisation de ces tubes fait l'objet de la note [3].

TABLEAU I : PRINCIPALES CARATÉRISTIQUES DES PRODUITS ÉTUDIÉS

	Fabricant	Résine				Tubes		
		Nom commercial	Nature	Tg	Allong <sup>t</sup> à rupture (%)	Fibres partie mécanique	Structure	Taux de verre (% poids)
A	SEPMA	ATLAC 382.05.AD (ICI)	polyester	140°C	2	verre E 2400 tex	- Couche anti-corrosion : (1 mm) . un voile de PAN . un mat de verre 375 g/m <sup>2</sup> . une grille de verre  - Partie mécanique : (4 mm) . 9 couches à ± 55°	69
B	CORD FRANCE	DERAKANE 411.45 (DOW CHEMICAL)	vinylester	114°C	6,5	verre ECR 2400 tex	- Couche anti-corrosion : (1,5 mm) . un voile verre . un mat de verre 350 g/m <sup>2</sup> (1,5 mm)  - Partie mécanique : (4 mm) . 10 couches à ± 55°	73

Plusieurs types de tubes ont été soumis aux contrôles par émission acoustique :

- des tubes sains, réalisés avec les résines A et B,
  - des tubes avec chocs, réalisés avec les résines A et B,
  - des tubes comportant des défauts implantés volontairement, réalisés avec la résine B seulement. Ces défauts sont représentatifs de ceux qui sont généralement rencontrés en fabrication (délaminages, manques imprégnation). La caractérisation de ces tubes fait l'objet de la note [4].
- Les caractéristiques des tubes soumis aux essais, leur pression de perlage<sup>1</sup> sont indiquées dans le tableau II.

## 2.2 - Description des défauts

### 2.2.1 - Défauts de choc

Un des principaux problèmes posés par les matériaux composites réside dans leur sensibilité aux chocs qui peuvent intervenir lors des opérations de manutention, de montage, ou de maintenance (chute d'outils, de pierres,...).

Des essais, destinés à évaluer l'énergie à partir de laquelle un impact devient visible et entraîne un abaissement significatif de la pression de perlage du tube, ont donc été menés en collaboration avec le Laboratoire d'Études et d'Essais Mécaniques de la Direction de Études et Techniques Nouvelles du Gaz de France, dans le cadre d'une thèse [5].

Les chocs ont été réalisés sur l'installation de GDF : système à masse tombante, équipé d'un poinçon hémisphérique. L'énergie de choc est réglable par l'intermédiaire de la masse du poinçon et de la hauteur de chute [6].

Ces essais ont montré (tableau III) que les premiers endommagements, visibles en micrographie, correspondent à la fissuration de la couche anti-corrosion interne ; elle intervient en moyenne pour des chocs d'énergie 3J pour les tubes en résine A et 7J pour les tubes en résine B [5]. L'impact devient visible, à partir de la face externe des tubes, pour des chocs d'énergie 4J pour les tubes en résine A et de 8J pour les tubes en résine B. On note cependant que, pour des énergies de cet ordre, la pression de perlage des tubes n'est pas affectée de manière notable.

La différence de comportement entre les deux types de tubes est attribuée à la différence de ductilité de la résine : la résine B vinylester, plus ductile, est moins sensible à la fissuration.

---

<sup>1</sup> - Pression de perlage : pression à partir de laquelle, au cours d'une mise en pression hydraulique, des gouttes d'eau commencent à sourdre à travers la paroi.



TABLEAU II : CARACTÉRISTIQUES DES TRONÇONS DE TUBES ETUDIÉS

Résine	Repère du tronçon de tube	Longueur du tronçon (m)	Type de défaut	Pression de perlage (bar)*
A	5'A3	0,7	-	100 à 150
	5'A2	0,7	-	
	2A1	2	-	
	2A3	2	-	
	5A1	2	-	
	C4'A4	0,7	choc 2J	150
	C4'A7	0,7	choc 2J	150
	C4'A2	0,7	choc 3J	
B	23B7	0,7	-	200 à 250
	23B9	0,7	-	
	35B1	2	-	
	35B2	2	-	
	35B3	2	-	
	35B4	2	-	
	C34B5	0,7	choc 5J	220
	C34B2	0,7	choc 6J	210
	C34B4	0,7	choc 7J	200
	D12B6	0,7	manque imprégnation d'un roving	114
	D8B6	0,7	délaminage à cœur	220
	D5B6	0,7	délaminage à l'interface couche anti-corrosion et partie mécanique	130 (perlage aux bouchons)

\* Valeurs extraites de [3], [4] et [5], obtenues lors d'essais sous pression interne d'eau ou d'huile, avec effet de fond sur des tubes issus des mêmes fabrications que les tubes objets de cette étude.

**TABLEAU III : RESULTATS DES ESSAIS DE CHOC [5]**

Résine	Energie des chocs (J)	
	Seuil de fissuration de la couche anti-corrosion	Seuil de visibilité depuis la face externe
<b>A</b>	<b>2</b>	<b>4</b>
<b>B</b>	<b>5</b>	<b>8</b>

Au vu de ces résultats, il a été décidé d'effectuer les contrôles par émission acoustique sur des tubes comportant des chocs d'énergie 2 et 3J pour la résine A, et 5, 6, et 7J pour la résine B. En effet, il est apparu intéressant d'évaluer les performances de l'émission acoustique pour la détection de chocs à la limite de détection visuelle par l'extérieur des tubes.

Des photographies par transparence des endommagements des tubes soumis aux essais sont présentées sur les figures 1 à 6 (le mode opératoire des prises de vue est détaillé dans la note [1]). On remarquera que tous les impacts sont visibles en face interne des tubes.

#### 2.2.2 - Défauts intentionnels de fabrication

Les contrôles par émission acoustique ont également été effectués sur des tronçons de tubes présentant les défauts intentionnels de fabrication suivants (pour des tubes en résine B seulement) :

- mauvaise imprégnation d'une nappe de rovings, à cœur du tube,
- délaminage à cœur de la partie mécanique,
- délaminage à l'interface entre la couche anti-corrosion et la partie mécanique .

Ces défauts sont présents sur toute la longueur des tubes. Les moyens utilisés par la société CORD France pour l'implantation de ces défauts sont détaillés dans les notes [1] et [4].

Les figures 7 à 9 présentent des photographies par transparence des tubes soumis aux essais et des coupes macrographiques des défauts. Ces figures sont extraites du document [4].

Des essais en pression interne d'eau, avec effet de fond effectués sur des tubes présentant des défauts de même nature, ont montré [4] que seul le défaut de mauvaise imprégnation de rovings à cœur de la partie mécanique abaisse significativement la pression de perlage (moyenne sur trois tubes : 114 bar au lieu de 210 bar, soit une réduction de 45%).

### **3 - CONTROLE PAR EMISSION ACOUSTIQUE**

#### **3.1 - Rappel des principes de l'émission acoustique**

L'apparition ou l'évolution de défauts dans un matériau se traduit par une libération d'énergie au sein de ce dernier. Une partie de l'énergie libérée se transforme en une onde de contrainte qui se propage dans le matériau. Ce phénomène est appelé "émission acoustique". Un capteur, composé le plus souvent d'une pastille en céramique piézo-électrique, convertit l'onde acoustique en un signal électrique, qui est ensuite amplifié et traité.

Cette technique a été très souvent appliquée pour le contrôle des pièces en matériaux composites car les mécanismes d'endommagement de ces matériaux (fissuration de la résine, rupture des interfaces fibres-matrice, délaminage et rupture de fibre) génèrent des ondes acoustiques de forte énergie.

#### **3.2 - Le Code CARP (ASTM E 1118)**

En 1983, le CARP (Committee on Acoustic emission from Reinforced Plastics) recommande aux États Unis, deux pratiques pour l'inspection ou la surveillance par émission acoustique de tuyauteries, réservoirs et capacités en résine thermodurcissable renforcée de fibres de verre, afin d'en vérifier l'intégrité structurale. Ces travaux ont abouti à la publication en 1986 d'une norme, sous la référence ASTM E 1118.

En France, le CETIM propose une traduction de cette norme sous forme de deux documents de "Pratique Recommandée" dont l'un concerne plus spécialement les systèmes de canalisations [7].

Cette pratique recommandée consiste à surveiller les tuyauteries par émission acoustique pendant des séquences de pressurisations (la pression maximale d'épreuve est généralement comprise entre 1,1 et 1,5 fois la pression maximale de service). Les signaux obtenus sont comparés à des critères définis à partir de signaux calibrés. La figure 10.a illustre le déroulement des séquences de mise en pression des tubes pendant l'essai. Les critères d'acceptation sont définis dans le tableau IV.

#### **3.3 - Description des contrôles effectués par le CETIM**

##### **3.3.1 - Description de l'appareillage et des conditions d'essai**

Les essais effectués par le CETIM<sup>2</sup> ont fait l'objet des rapports [8], [9] et [10]. On trouvera ci-dessous les caractéristiques et les conclusions essentielles de ces essais.

Pendant les essais, les tubes sont soumis à une pression d'eau. Leurs extrémités sont obturées par des bouchons métalliques collés à l'aide d'une colle époxyde et sont libres de se déplacer (solicitation en pression interne, avec effet de fond). Les séquences de pressurisation sont pilotées par un micro-ordinateur.

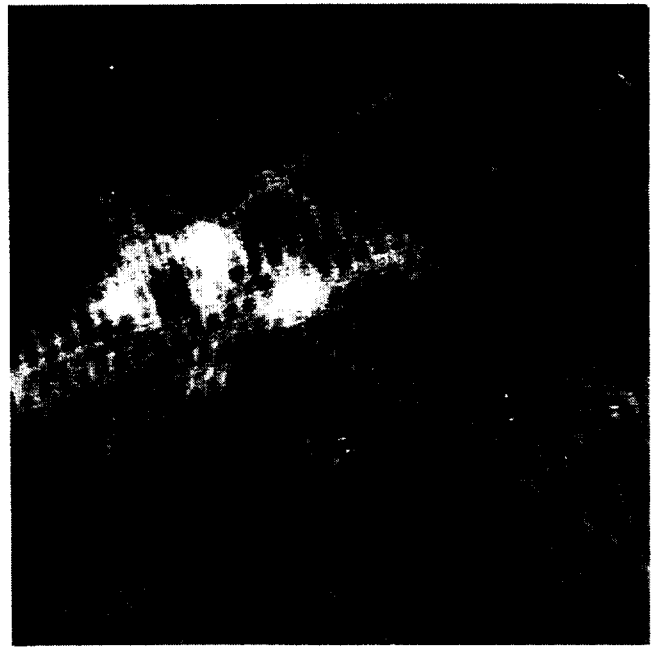
Sur chaque tube, on a placé 4 capteurs d'émission acoustique. Deux capteurs, C1 et C2, sont placés au centre du tube (dans le cas des tubes avec défaut ponctuel, les capteurs sont placés de part et d'autre du défaut). Les deux autres capteurs, C3 et C4, sont placés au voisinage des bouchons (figure 11).

---

<sup>2</sup> - CERD RNE 251 et 326

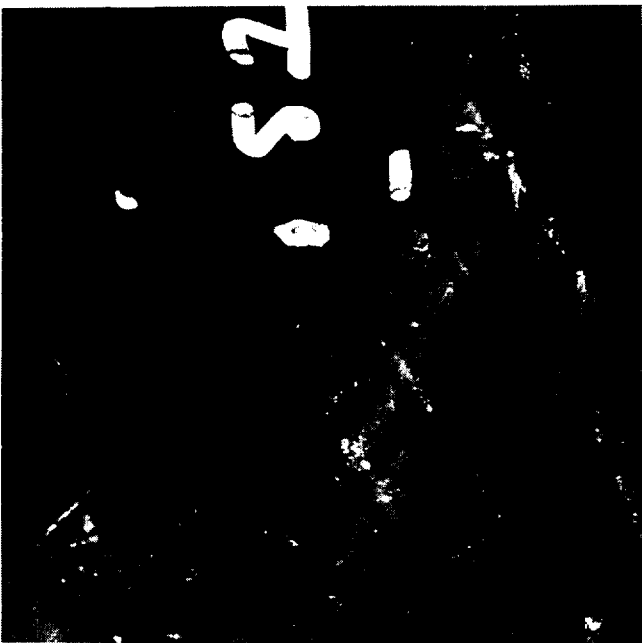


a - Vue de la face externe

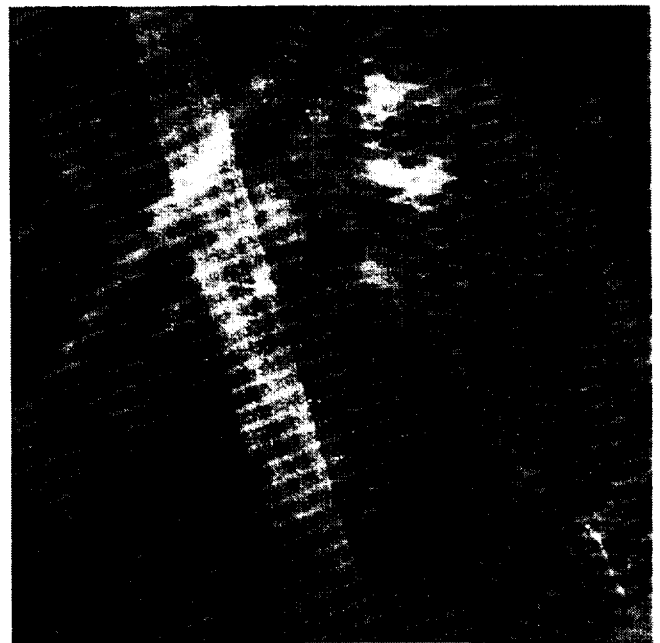


b - Vue de la face interne

Figure 1 - Résine A, tronçon C4'A4, choc d'énergie 2J.  
Photographie par transparence de la zone d'impact.

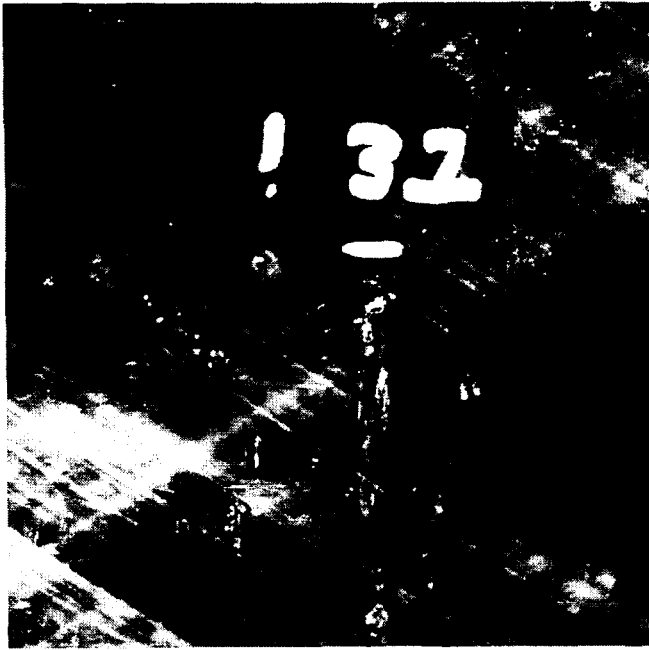


a - Vue de la face externe

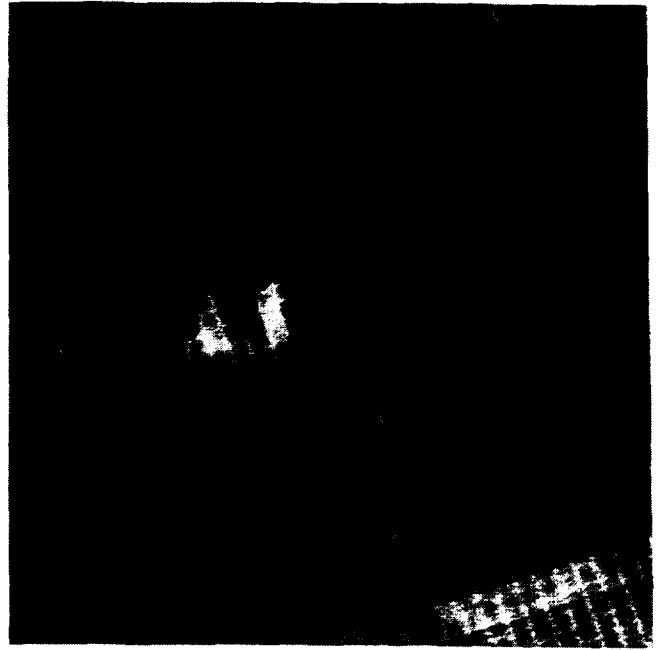


b - Vue de la face interne

Figure 2 - Résine A, tronçon C4'A7, choc d'énergie 2J.  
Photographie par transparence de la zone d'impact.



a - Vue de la face externe



b - Vue de la face interne

Figure 3 - Résine A, tronçon C4'A2, choc d'énergie 3J.  
Photographie par transparence de la zone d'impact.



a - Vue de la face externe

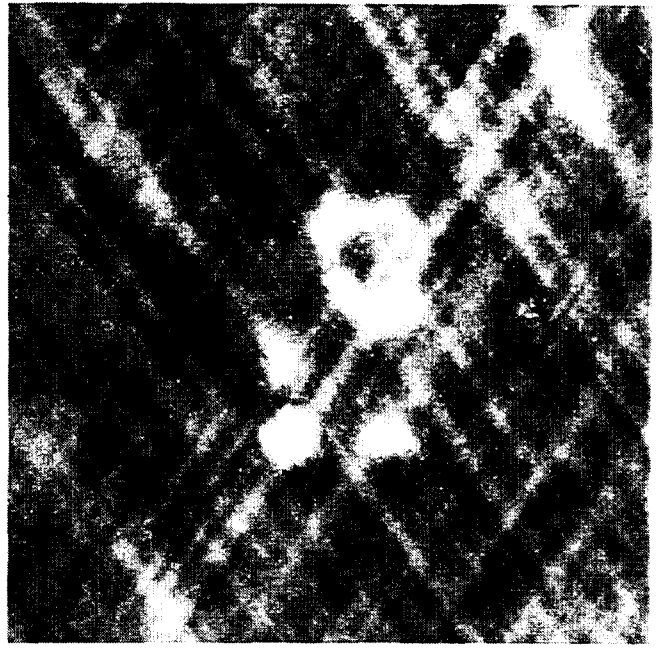


b - Vue de la face interne

Figure 4 - Résine A, tronçon C34B5, choc d'énergie 5J.  
Photographie par transparence de la zone d'impact.

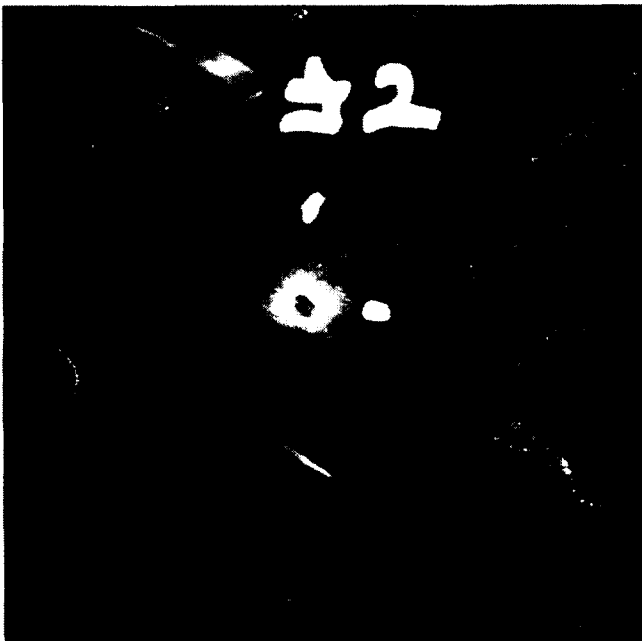


a - Vue de la face externe

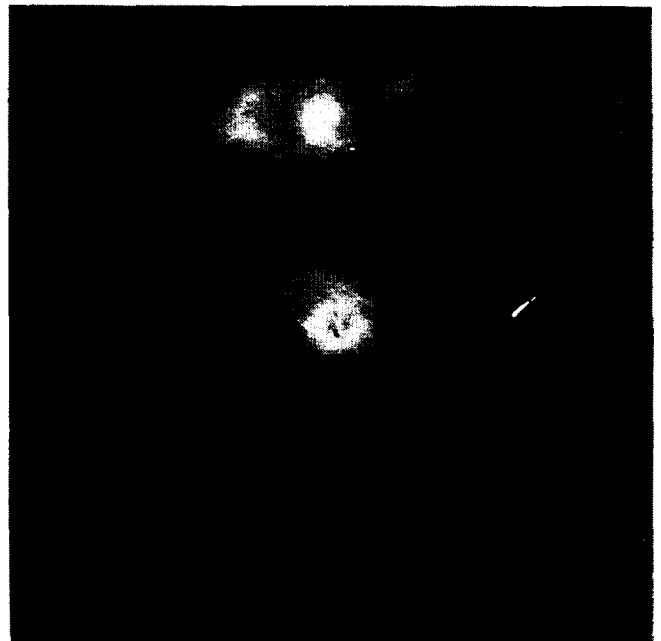


b - Vue de la face interne

Figure 5 - Résine B, tronçon C34B2, choc d'énergie 6J.  
Photographie par transparence de la zone d'impact.



a - Vue de la face externe

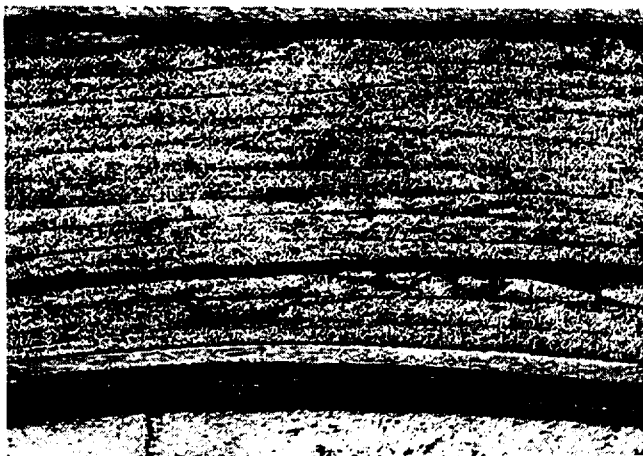


b - Vue de la face interne

Figure 6 - Résine B, tronçon C34B4, choc d'énergie 7J.  
Photographie par transparence de la zone d'impact.

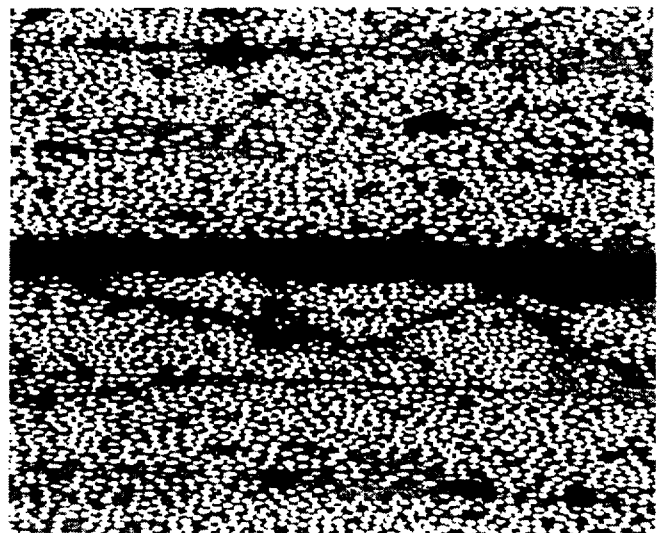


a - Photographie par transparence à partir de la face externe



x10

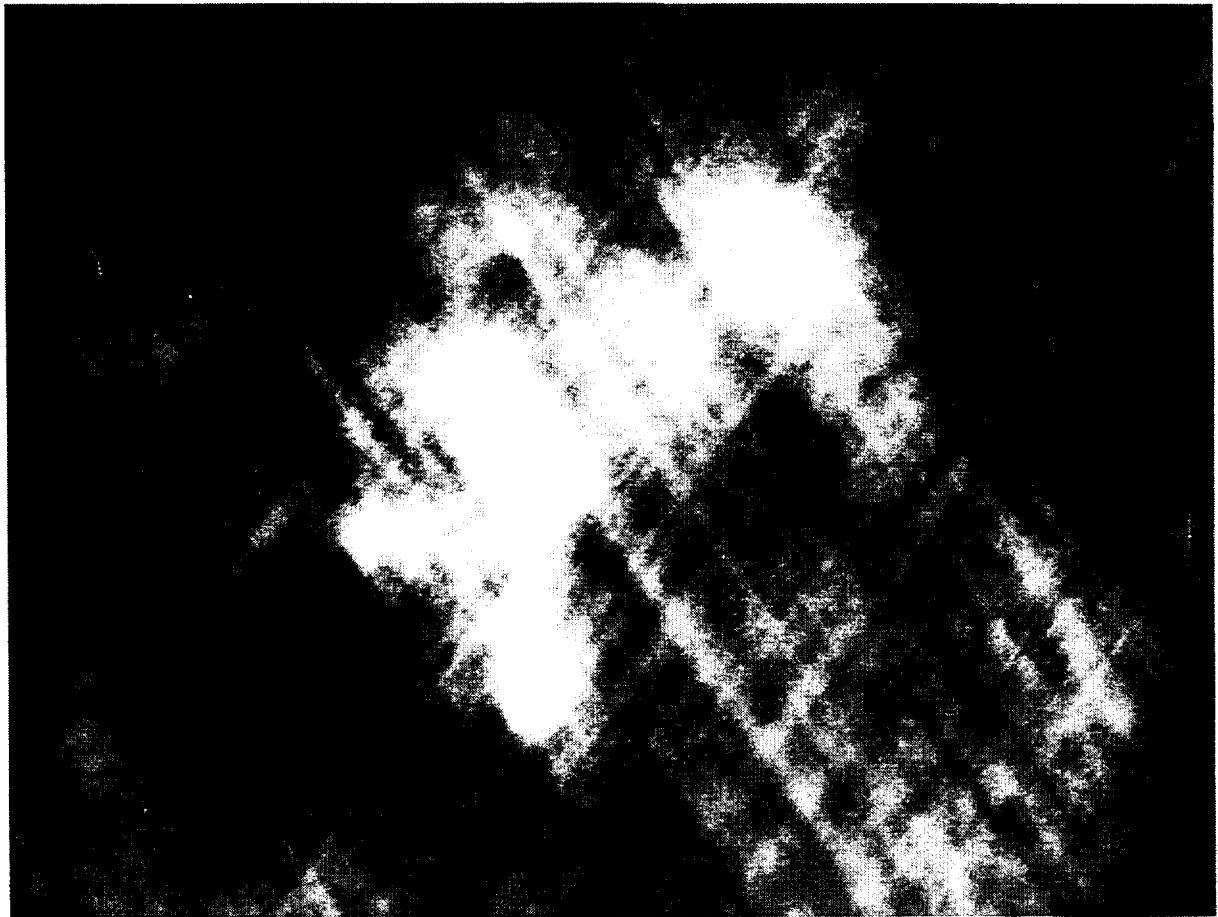
b - Observation sur coupe micrographique



x35

c - Détail de b

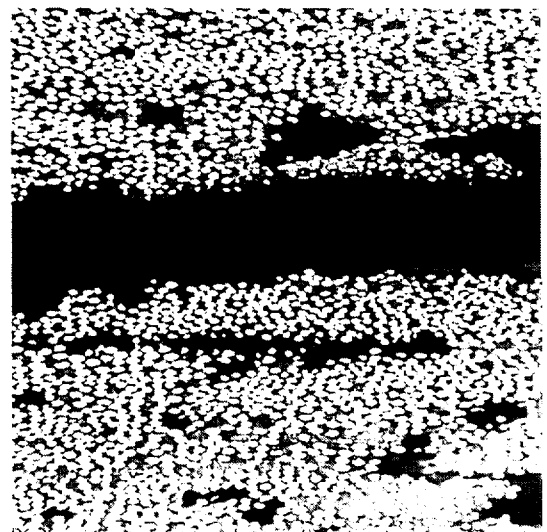
Figure 7 - Mauvaise imprégnation d'une nappe de roving. Tube D12B [4].



a - Photographie par transparence à partir de la face externe



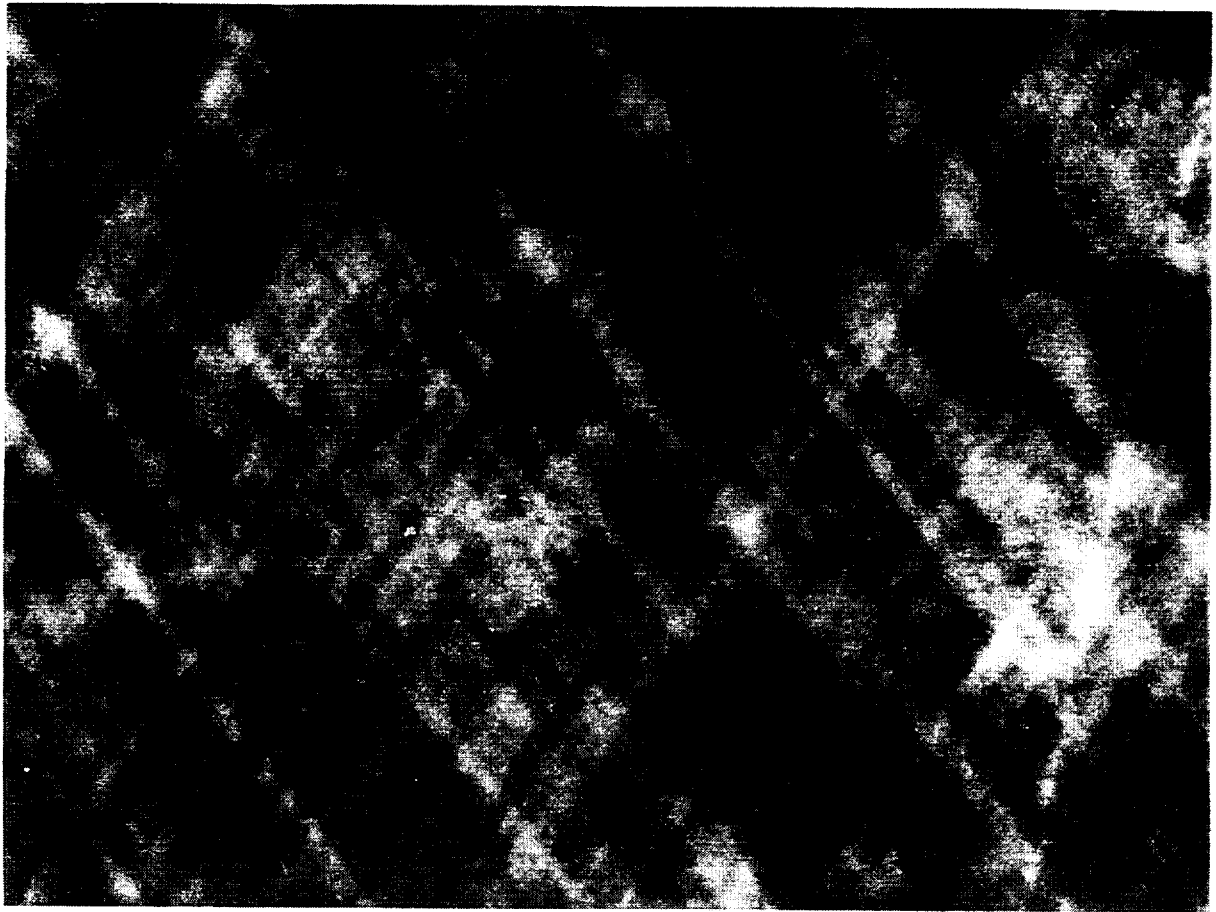
b - Observation sur coupe micrographique  
x10



c - Détail de b  
x35

Figure 8 - Délaminage à cœur. Tube D8B [4].



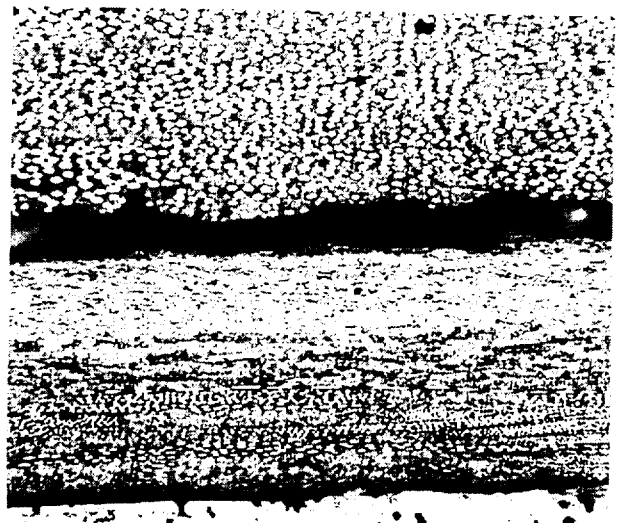


a - Photographie par transparence à partir de la face externe



x10

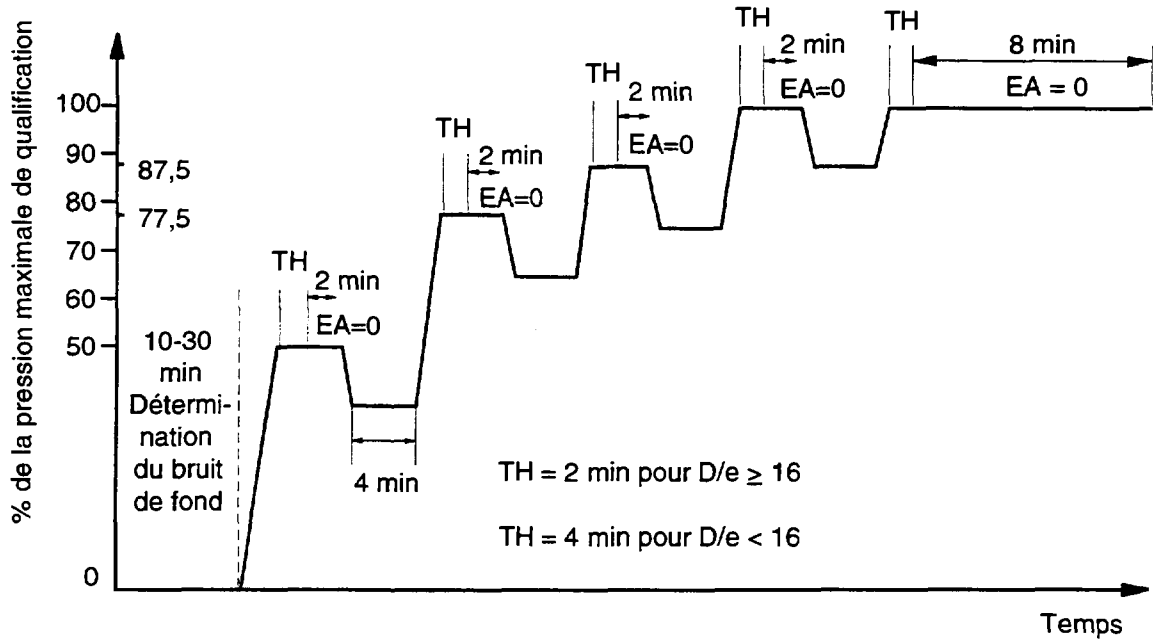
b - Observation sur coupe micrographique



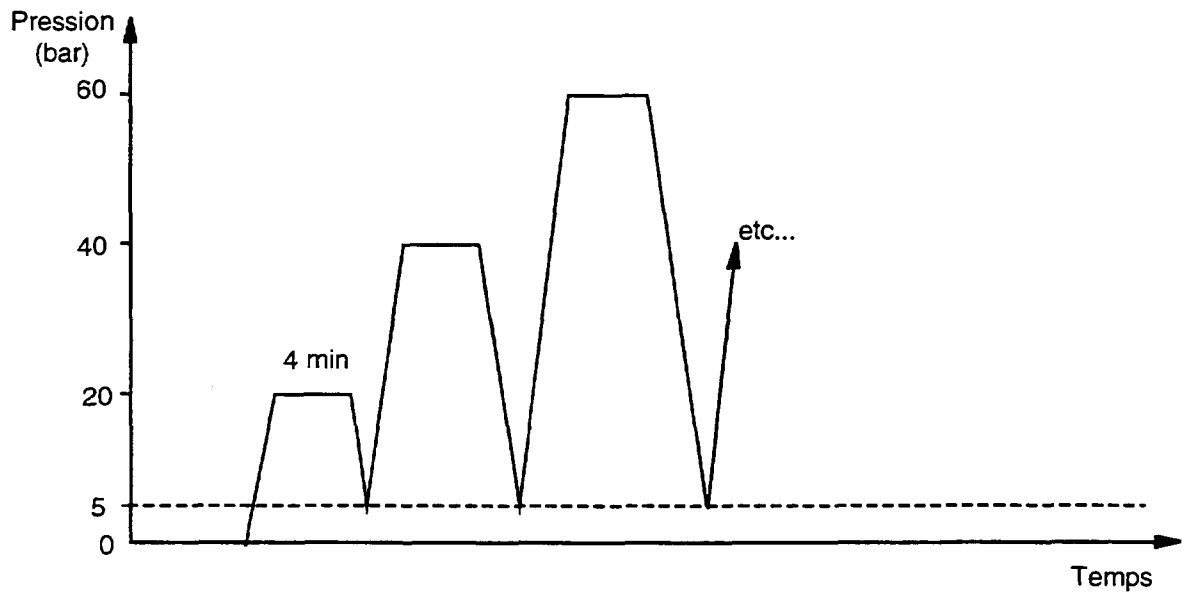
x35

c - Détail de b

Figure 9 - Délaminage à l'interface entre la couche anticorrosion et la partie mécanique.  
Tube D5B [4].



a - Essai de qualification suivant le code CARP  
Déroulement de la mise sous pression



b - Déroulement de la mise sous pression pour les essais destinés  
à la corrélation critères CARP / endommagement

Figure 10 : Déroulement des essais d'émission acoustique effectués sur les tuyauteries  
Déroulement de la mise sous pression [7]

TABLEAU IV - CRITERES D'ACCEPTATION PAR LE CODE CARP [8]

Critères	Premier chargement	Chargements suivants	Signification du critère
1 - Emission par palier	Pas d'amplitude > $A_m$ et : - pas plus de 5 évènements/min après 2 min si $D/e \geq 16$ - pas plus de 5 évènements/min après 4 min si $D/e < 16$	- pas d'émission après 2 min de palier si $D/e \geq 16$ - pas d'émission après 4 min de palier si $D/e < 16$	Mesure l'endommagement dû à la microfissuration de la matrice pendant le palier.
2 - Nombre total de coups N	$N < N_c$	$N < N_c/2$	Mesure l'endommagement global depuis le début de l'essai
3 - DBC	$< M$	$< M$	Mesure le délaminage, la rupture de joints collés ou la croissance de fissures importantes.
4 - Nombre d'évènements dont l'amplitude est supérieure au seuil de référence $A_t$	$< 10$ (en principe pour les tubes neufs)	$< 10$ (en principe pour les tubes neufs)	Mesure des ruptures microstructurales de forte énergie. Critère souvent associé à des ruptures de fibres.
5 - Rapport Félicity		$> 0,95$	Dépend de la gravité de l'endommagement global

-  $A_S$  et  $A_t$  caractérisent la sensibilité de l'appareillage.

.  $A_S$  seuil de détection : c'est l'amplitude des signaux provenant de la rupture de mines de crayon, à travers une plaque de plomb de référence (mines et plaque sont définies dans le code).

.  $A_t$  seuil de référence : c'est l'amplitude des signaux provenant de la rupture de mines de crayon, à travers une barre d'acier de référence (mines et barre sont définies dans le code).

.  $A_m$  amplitude moyenne =  $(A_S + A_t)/2$

-  $N_c$  : nombre d'alternances critique. Il caractérise la propagation des signaux dans le matériau contrôlé : c'est le nombre d'alternances émises par la rupture de mines de crayon, à travers un échantillon du matériau contrôlé.

- N : nombre d'alternances (ou nombre de coups) dépassant le seuil  $A_S$ .

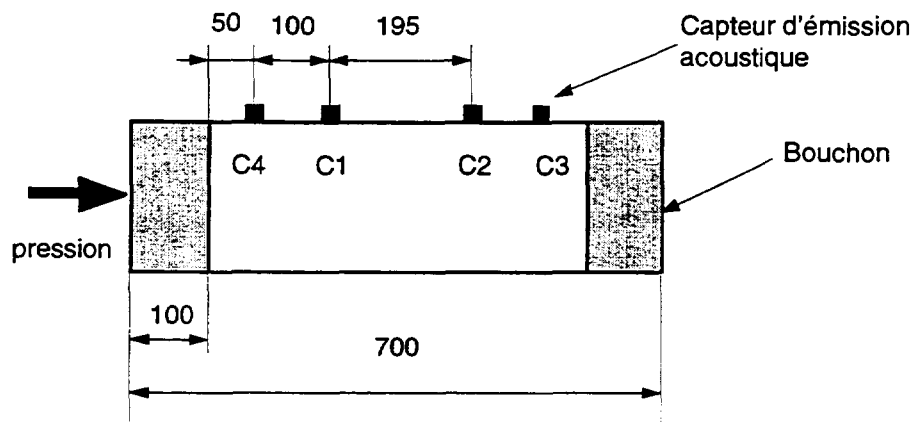
- DBC (Delamination, Bond, Crack) : paramètre caractérisant l'énergie des salves.

- M : valeur de l'énergie d'un signal électrique de référence défini dans le code CARP.

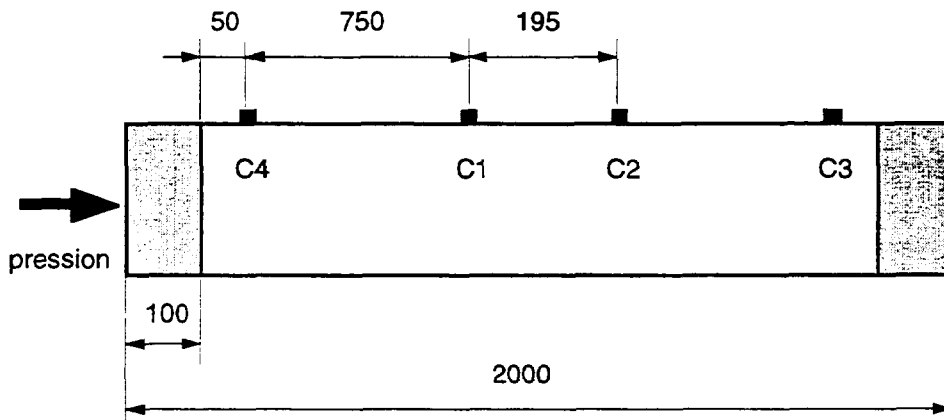
-  $A_S$ ,  $A_t$ ,  $N_c$ , DBC, M sont déterminés lors de la calibration de la chaîne de mesure.

- Rapport Félicity : ce rapport est défini lorsqu'on effectue 2 chargements successifs d'un composant, séparés par un déchargement. C'est le rapport de la contrainte pour laquelle l'émission acoustique reprend au cours du deuxième chargement sur la contrainte atteinte lors du premier chargement.

-  $D/e$  : rapport diamètre sur épaisseur du tube



a - Disposition des capteurs d'émission acoustique pour les essais de qualification suivant le code CARP (cotes en mm)



b - Disposition des capteurs d'émission acoustique pour les essais destinés à la corrélation critères / endommagement (cotes en mm)

Figure 11 : Disposition des capteurs adoptées pour les essais d'émission acoustique

Les signaux d'émission acoustique sont recueillis par quatre capteurs piézo-électriques résonant à 180 kHz. Après pré-amplification, un système multi-voies (SPARTAN) permet d'enregistrer les signaux et de les caractériser en temps réel (nombre de salves, nombre d'alternances, amplitude crête, durée, temps de montée, énergie).

La calibration de la chaîne d'émission acoustique est une étape importante de l'essai ; elle est définie dans le code CARP [8]. Elle consiste à évaluer la sensibilité de la chaîne et à déterminer les caractéristiques des signaux de référence qui sont utilisés pour définir des critères de qualification (seuil de détection  $A_s$ , seuil de référence  $A_t$ ,...), (tableau IV).

Le CETIM a effectué le contrôle de tous les tubes, sains ou avec défauts, suivant le code CARP pour se prononcer sur leur qualification et évaluer les performances de ce code pour un éventuel contrôle en service (tableau V et figure 10).

La pression de perlage de ces tubes (environ 100 bar pour les tubes en résine A et 200 bar pour les tubes en résine B [3], [5]) étant largement supérieure à la pression de service de 6 bar, ces essais de qualification ont été menés jusqu'à une pression maximale de 25 bar ; cette pression représente plus de 4 fois la pression maximale de service, au lieu de 1,1 à 1,5 fois comme il est habituellement pratiqué.

Le CETIM a ensuite effectué des essais complémentaires sur certains tubes sains, pour étudier l'évolution des "paramètres CARP" en fonction de leur endommagement. Ces essais constituent une première approche de l'étude de l'endommagement de ces matériaux.

Ces essais ont porté sur des tubes de longueur 2 m, afin de mieux séparer le "bruit" créé par les bouchons. Ils ont été mis en pression jusqu'au perlage. Les tubes sont, de plus, instrumentés pour permettre l'évaluation de l'endommagement, à partir de la mesure des déformations longitudinales et diamétrales. Un intervalle de 12 h a été laissé entre la qualification et les essais complémentaires pour permettre la relaxation du matériau.

### 3.3.2 - Exploitation des résultats

Dans un premier temps, on a appliqué les critères de qualification du code CARP, aux signaux provenant des quatre capteurs considérés séparément. Dans un deuxième temps, on a appliqué une méthode de localisation dans le but d'éliminer les signaux parasites provenant des extrémités des tubes (parties usinées, collages). Cette localisation n'est pas demandée dans la procédure CARP.

La méthode de localisation, qui permet de déterminer approximativement l'origine des signaux, est complexe à mettre en œuvre dans les matériaux composites, à cause de leur anisotropie.

D'autre part des travaux précédents ont conduit le CETIM à modifier le critère 1 [8] : le critère est considéré comme dépassé si au moins deux salves d'amplitude supérieure à  $A_m$  sont émises pendant les deux dernières minutes de palier, et si on recueille également au moins une salve pendant les deux dernières minutes du palier suivant. Ce critère modifié est légèrement moins sévère que celui du code, qui est dépassé dès que l'on a émission après 2 min de palier, pour tous les chargements à l'exception du premier pour lequel on tolère 5 salves après 2 min.

Enfin, le CETIM a par ailleurs mis en œuvre une méthode d'analyse statistique des données, en plus du dépouillement classique des résultats, afin de mieux visualiser les informations apportées par les critères du code CARP.

TABLEAU V : CONDITIONS DES ESSAIS EFFECTUÉS AU CETIM

Résine	Repère du tronçon	Longueur totale (m)	Nature du défaut	Type d'essai effectué	Séquence de préssurisation	Position des capteurs d'EA
A	5A'2 5A'3	0,7	-	Qualification	Figure 10.a	Figure 11.a
	C4'A4 C4'A7 C4'A2		Chocs	Code CARP		
	2A1 2A3 5A1	2	-	Qualification puis corrélation critères/endommagement	Figure 10.a puis 10.b	Figure 11.b
B	23B7 23B9	0,7	-	Qualification Code CARP	Figure 10.a	Figure 11.a (sauf 23B8 [8])
	C34B5 C34B2 C34B4		Chocs			
	D12B6 D8B6 D5B6		Défauts de fabrication			
	35B1 35B2 35B3 35B4	2	-	Qualification puis corrélation critères/endommagement	Figure 10.a puis 10.b	Figure 11.b

## 4 - RÉSULTATS DES ESSAIS EFFECTUÉS SUIVANT LE CODE CARP

Les valeurs des différents critères, obtenues jusqu'à la pression de 25 bar, pour chacun des tubes et pour chaque capteur, sont données en annexe A. On a ensuite indiqué les résultats obtenus après application de la méthode de localisation.

### 4.1 - Résultats obtenus sur les tubes sains

Si l'on considère les résultats obtenus pour l'ensemble des capteurs, on constate que seul 2 tubes sains sur 11 (5'A3 et 2A3) peuvent être qualifiés pour la pression de 25 bar : en effet, le critère 1 (émission pendant les paliers) est dépassé pour au moins un capteur pour tous les autres tubes (le critère 1 du code CARP et du critère 1 modifié conduisent au rejet des mêmes tubes).

L'analyse des résultats capteur par capteur montre, qu'en fait, une grande partie des signaux proviennent des extrémités ; ceci est par ailleurs conforté par les travaux précédents [3], [5] qui ont montré que le seuil de micro-fissuration de la résine est d'environ 40 bar pour la résine A et 100 bar pour la résine B, il paraît effectivement peu probable que les émissions pendant les paliers proviennent d'un endommagement des tubes.

La méthode de localisation, qui permet d'éliminer les signaux qui proviennent des extrémités, a été appliquée sur les 4 tubes sains de longueur 0,7 m ; on constate qu'elle donne des résultats plus satisfaisants (tableau VI) :

- 3 tubes sont qualifiés pour la pression de 25 bar (2 tubes B et 1 tube A)
- pour 1 tube A, le critère 1 est à la limite du dépassement pour le palier de 25 bar.

Sur les 7 tubes de plus grande longueur (2 m), on peut estimer qu'en ne considérant que les résultats obtenus avec les deux capteurs centraux, C1 et C2, on élimine une grande partie des signaux des extrémités. On note alors que :

- 3 tubes sont qualifiés jusqu'à 25 bar : 2 tubes A et 1 tube B
- pour 3 tubes, le critère 1 est dépassé à 25 bar : 1 tube A et 2 tubes B
- pour 1 tube, le critère 1 est dépassé à 21,8 bar : 1 tube B.

#### Remarques :

1 - C'est le critère 1 (émission pendant les paliers) qui est, dans tous les cas, très nettement, le premier à être dépassé. Les critères 2, 3 et 4 sont dépassés dans un nombre plus réduit de cas. Le critère 5 (effet Félicity), ne présente pas de variation notable pour les tubes étudiés.

2 - On remarque que, sur l'ensemble des critères, les tubes B émettent plus tôt et davantage que les tubes A. Ceci est sans doute dû au fait que la résine B, plus ductile, permet des mouvements internes (notamment aux interfaces fibres-matrice) pour des pressions plus faibles [5].

3 - Si les essais de qualification avaient été menés jusqu'à la pression de 9 bar (1,5 fois la pression de service, comme il est demandé dans le code CARP) ou même 12 bar (2 fois la pression de service) il est vraisemblable que tous les tubes sains auraient été qualifiés.

TABLEAU VI : RÉSULTATS DES ESSAIS DE QUALIFICATION SUIVANT LE CODE CARP  
(signaux localisés)

Résine	Type de défaut		Longueur du tronçon (m)	Repère du tube	Pression du palier (bar) et n° du critère dépassé				Pression de perlage (bar) *
					12,5	18,7	21,8	25	
A	Tubes sans défauts		0,7	5'A3					100 à 150
				5'A2				1	
			2	2A1				1	
				2A3					
				5A1					
	Tubes avec chocs	2J	0,7	C4'A4				1	150
		2J		C4'A7					
3J		C4'A2						150	
B	Tubes sans défauts		0,7	23B7					200 à 250
				23B9					
			2	35B1					
				35B2				1	
				35B3			1		
				35B4				1	
	Tubes avec chocs	5J	0,7	C34B5					220
		6J		C34B2					210
		7J		C34B4			1		200
	Tubes avec défauts de fabrication	MIR	0,7	D12B6	1,2,4	***			114
		DC		D8B6				1,4	220
DAC		D5B6					1	>130 **	

MIR : manque imprégnation d'un roving.

DC : délaminage à cœur.

DAC : délaminage à l'interface couche anti-corrosion et partie mécanique.

\* - Valeurs extraites de [3], [4] et [5], obtenues lors d'essais sous pression interne d'eau ou d'huile, avec effet de fond sur des tubes issus des mêmes fabrications que les tubes objets de cette étude.

\*\* - Perlage aux bouchons, en dehors de la zone de défaut.

\*\*\* - Critère 1 largement dépassé pour la pression 12,5 bar.



#### 4.2 - Résultats obtenus sur les tubes avec défauts

A l'examen des résultats, après application de la méthode de localisation, on constate que les 6 tubes avec chocs se différencient difficilement des tubes sains :

- 4 tubes sont qualifiés (2 tubes A avec chocs de 2J et 3J et 2 tubes B avec chocs 5J et 6J),
- pour 1 tube A avec choc de 2J, le critère 1 est dépassé pour le palier à 25 bar,
- pour 1 tube B avec choc de 7J, le critère 1 est dépassé pour le palier à 21,8 bar.

On note le rebut d'un tube A avec choc de 2J à 25 bar, alors que le tube A avec choc de 3J est qualifié : ceci n'est pas vraiment étonnant compte tenu de la dispersion des caractéristiques de ces matériaux.

Par contre, les 3 tubes avec défauts de fabrication sont tous les trois rebutés. Le défaut de manque d'imprégnation est à l'origine de la plus forte émission acoustique (les critères sont largement dépassés dès 12,5 bar). Pour les 2 autres tubes, les critères sont dépassés pour le palier à 25 bar.

#### Remarque :

Il apparaît que les essais suivant le code CARP (critères 1, 2, et 4), donnent une bonne idée de la nocivité des défauts. En effet, si on les compare aux résultats des essais de perlage [5], on note que :

- les chocs étudiés, qui sont peu nocifs puisque la pression de perlage n'est pas notablement affectée sont à la limite de détection par le code CARP.
- de même, le délaminage à cœur, qui affecte peu la pression de perlage, n'est rebuté qu'au palier de 25 bar.
- le manque d'imprégnation, qui est beaucoup plus nocif puisque la pression de perlage est abaissée de 45% est clairement rebuté.

#### 4.3 - Analyse statistique multidimensionnelle des données

Afin de mieux visualiser les informations apportées par chaque critère, le CETIM a appliqué une méthode d'analyse statistique multidimensionnelle à l'ensemble des résultats obtenus sur les 13 tubes de longueur 700 mm. Il s'agit de la méthode d'analyse en composantes principales (ACP), [10].

On considère la population des 13 individus (13 tubes) dont le comportement vis-à-vis du code CARP est caractérisé par 28 variables : les 28 critères du code CARP (7 critères par capteur : critères 2, 3 et 4 et les 4 valeurs du critère 1). L'ACP consiste à déterminer les axes d'inertie principaux de cette population, dans un espace à 28 dimensions, afin de tirer des corrélations statistiques sur les variables d'une part, et sur la population des individus d'autre part.

Cette analyse conduit aux conclusions suivantes :

- les critères 1, 2 et 4 sont bien corrélés entre eux, alors que le critère 3 qui caractérise les phénomènes de forte énergie s'en sépare,
- le comportement des tubes avec chocs de faible énergie ne se différencie pas nettement de celui des tubes sains,
- les tubes avec défauts de fabrication se démarquent nettement des tubes sains ou avec chocs : ils sont caractérisés par des valeurs importantes des critères 1, 2 et 4.

- sur l'un des axes (ensemble des critères 1, 2, et 4), le tube avec manque d'imprégnation de rovings se sépare des deux autres défauts de fabrication : on peut donc considérer cette axe comme un axe de nocivité.

L'analyse statistique des données permet donc de dégager des interprétations très voisines de l'exploitation classique des résultats, après application de la méthode de localisation. Il semblerait donc envisageable de s'affranchir de cette dernière méthode, très difficile à mettre en oeuvre dans le cas de structures en matériau composite anisotrope.

## **5 - RÉSULTATS DES ESSAIS COMPLÉMENTAIRES D'ÉVALUATION DE L'ENDOMMAGEMENT**

### **5.1 - Description des essais de mise en pression jusqu'au perlage**

A la suite des essais de qualification, les 7 tubes sans défaut, de longueur 2 m ont été soumis à une mise en pression jusqu'à un niveau beaucoup plus élevé (jusqu'au perlage ou presque), (figure 10). L'objectif de ces essais est d'étudier l'évolution des "paramètres CARP" en fonction de l'endommagement des tubes. Ces essais constituent une première approche de l'étude de l'endommagement de ces matériaux.

Les résultats du suivi par émission acoustique, pendant ces mises en pression, ont été analysés en utilisant les critères de la procédure CARP.

Pour les tubes A, la valeur des paliers a été fixée à 20, 40, 60, 80, 100 et 120 bar (si le perlage n'a pas été constaté à 100 bar). Pour les tubes B, dont la pression de perlage se situe aux environs de 210 bar, on a rajouté des paliers à 150 et 180 bars. On note que pour les tubes en résine B, le perlage, qui doit apparaître aux environs de 200 bar [3], [5], n'a pas pu être atteint à cause du décollement des bouchons, entre 140 et 180 bar.

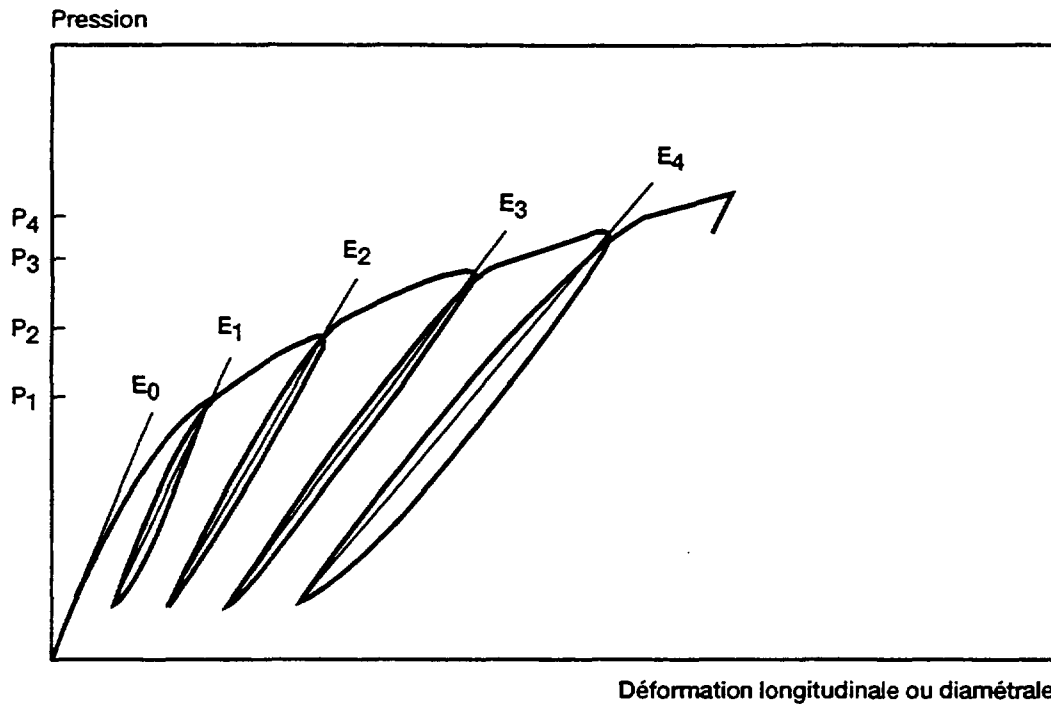
Les tubes étaient équipés d'un double extensomètre à jauge, pour apprécier leurs déformations longitudinales et diamétrales (extensomètre DISCAPTELEC développé dans le cadre de la thèse [6], fourni par EDF). Le module d'Young a été mesuré aux différentes pressions en calculant la pente des courbes pression-déformation pendant chaque montée. On a caractérisé l'endommagement des tubes par la valeur de la variation relative du module d'Young :  $d = (E_0 - E) / E_0$  (figure 12).

### **5.2 - Résultats des mesures d'émission acoustique**

On a noté la pression pour laquelle chaque critère du code CARP est dépassé ; les résultats sont rassemblés dans l'annexe B [9]. On a porté, sur ces courbes de la figure 13, la fourchette de pression pour laquelle les critères sont dépassés pour chaque traducteur et pour chaque tube. On note que :

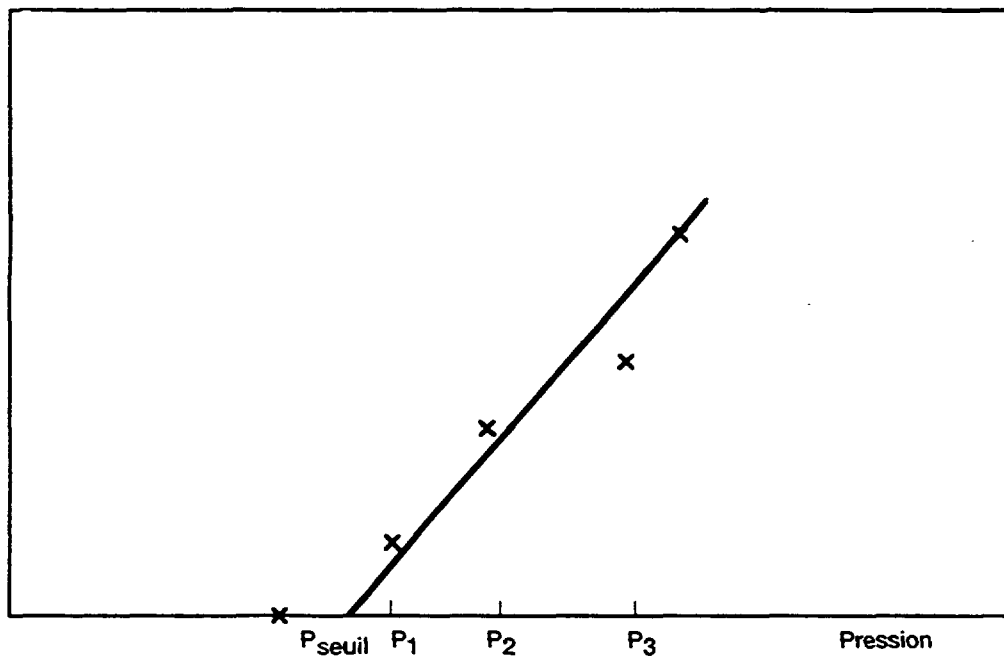
- pour la résine A, les critères 1, 2 et 4 sont dépassés, dans cet ordre, pour des pressions assez voisines, de l'ordre de 40 bar. Le critère 3 est dépassé pour une pression un peu plus élevée : entre 60 et 80 bar.

- pour la résine B, les critères 2, 1, 4 sont dépassés dans cet ordre, également pour des pressions voisines de l'ordre de 40 bar. Le critère 3 est dépassé pour une pression nettement plus élevée : entre 100 et 150 bar dans la plupart des cas (à 60 bar, dans le cas d'un capteur, sur un tube).



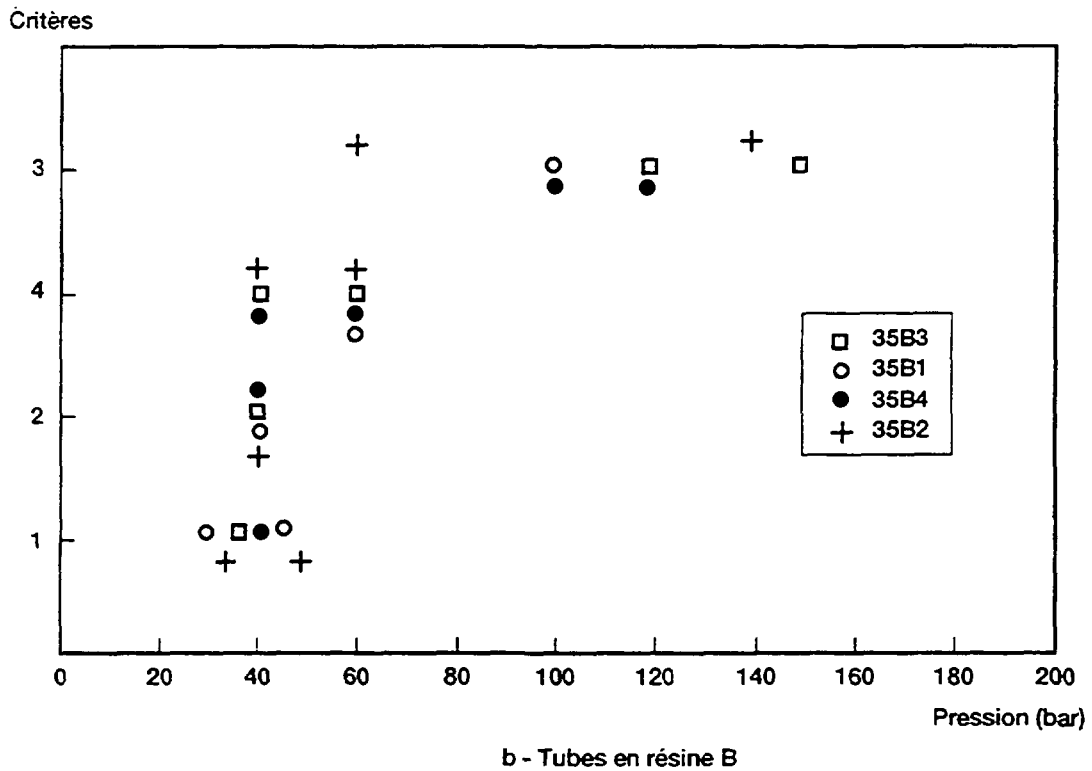
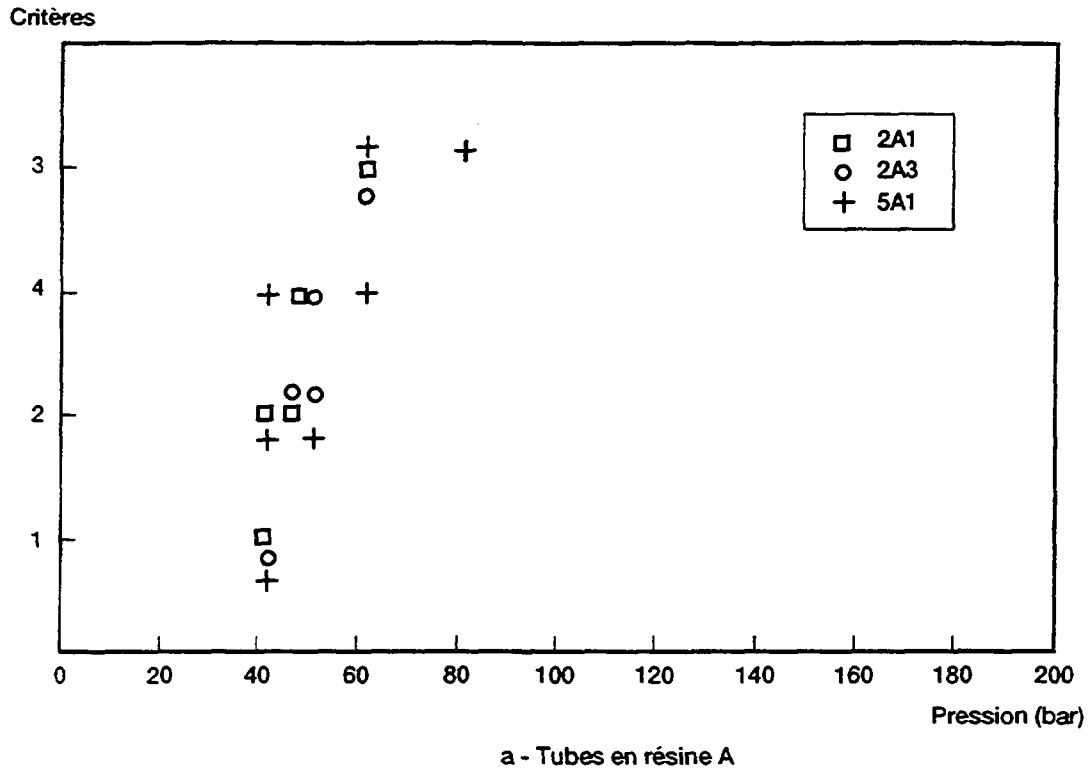
a - Détermination des modules élastiques au cours d'un essai de pression avec déchargements

$$\text{Endommagement } d = \frac{E_0 - E}{E_0}$$



b - Evolution de l'endommagement en fonction de la pression.

**Figure 12** - Suivi de l'évolution de l'endommagement lors d'essais avec déchargements par l'intermédiaire de mesures des modules élastiques.



Pour chaque tube on a noté l'intervalle de pression dans lequel les critères sont dépassés pour les 4 capteurs [9].

Figure 13 - Ordre de dépassement des critères du code CARP en fonction de la pression.

On note que les tubes A et B se comportent différemment vis-à-vis des critères 2 et 3 :

- le critère 2 est dépassé plus rapidement par la résine B, ce qui traduit une émissivité plus importante, dès les premiers paliers de la mise en pression.
- le dépassement du critère 3, qui traduit l'apparition de phénomènes de forte énergie (délamination, fissuration importantes de la matrice), apparaît beaucoup plus tardivement sur les tubes B.

On note que le rapport Félicity est presque toujours égal à 1.

### **5.3 - Résultats des mesures d'endommagement**

La variation du module d'Young  $d = (E_0 - E) / E_0$ , indicateur de l'endommagement des tubes, en fonction de la pression interne est représenté sur les figures 14 et 15. On a également porté sur ces courbes les résultats qui avaient été obtenus précédemment [5]. On note que :

- les variations du module diamétral sont relativement faibles pour les deux types de tubes et ne suivent pas d'évolution particulière. Ceci est en accord avec les travaux précédents. Il semble que ces faibles variations puissent être attribuées à un comportement quasi-élastique des tubes dans cette direction dû à la présence des fibres à 35° (enroulement à 55° de la génératrice des tubes) [5]. L'évolution du module diamétral ne sera plus étudiée par la suite.

- le module longitudinal, pour les tubes A, varie linéairement à partir d'une pression seuil d'environ 30 bar. On a montré, par des examens micrographiques [5], que ce seuil correspond au début de la fissuration de la résine aux interfaces fibres-matrice.

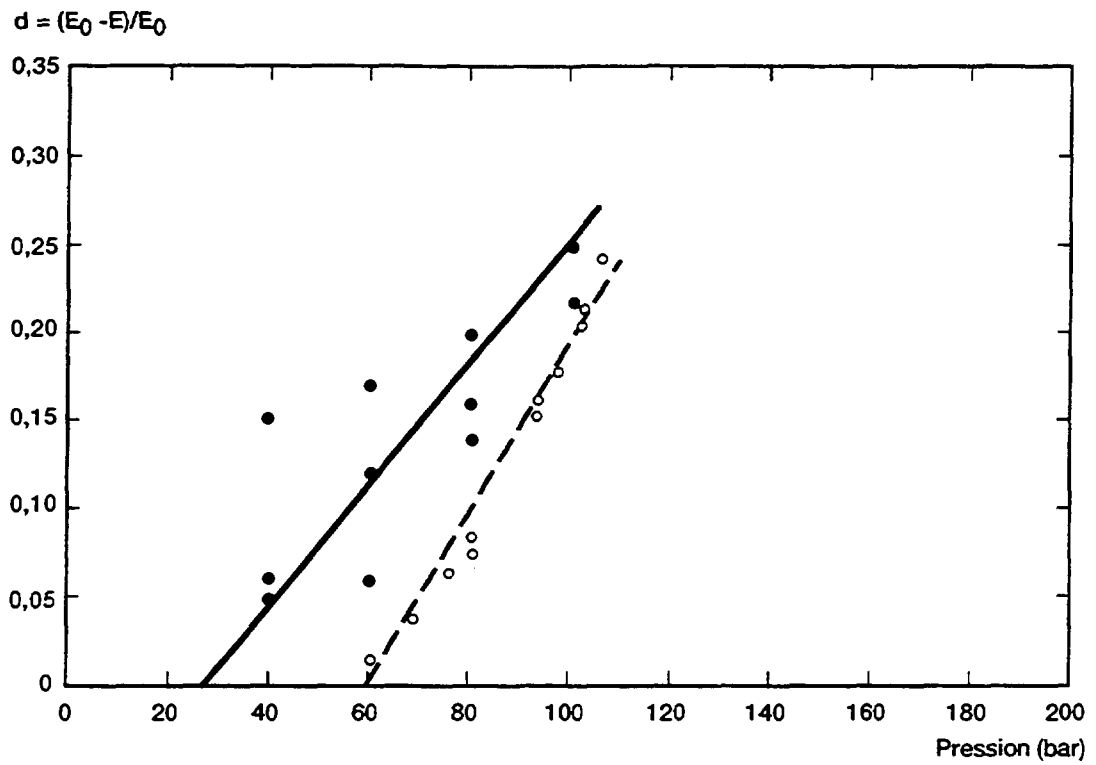
On note que ce seuil est inférieur, pour ces essais à la valeur obtenue précédemment (60 bar). Cet écart peut probablement s'expliquer par la dispersion entre lots de tubes et par des différences dans les méthodologies d'essai : vitesse de montée en pression plus lente au CETIM (5 bar/min au lieu de 30 bar/min environ pour les essais précédents), méthode de détermination du module d'Young.

- les mesures de module longitudinal, pour les tubes B, effectuées par le CETIM, sont très dispersées et difficilement exploitables. Les études précédentes [5] avaient montré une évolution en deux phases : dans un premier temps, jusqu'à environ 100 bar, alors qu'aucun endommagement macroscopique n'est visible sur coupe micrographique, une légère diminution du module est observée, attribuée à un effet de la viscoplasticité de la résine (fluage de la résine se superposant au chargement, réarrangement des fibres,...) ; à partir d'environ 100 bar, le module décroît linéairement, et on constate sur coupes micrographiques, comme pour la résine A, une décohésion des interfaces fibres-matrice dans la partie mécanique.

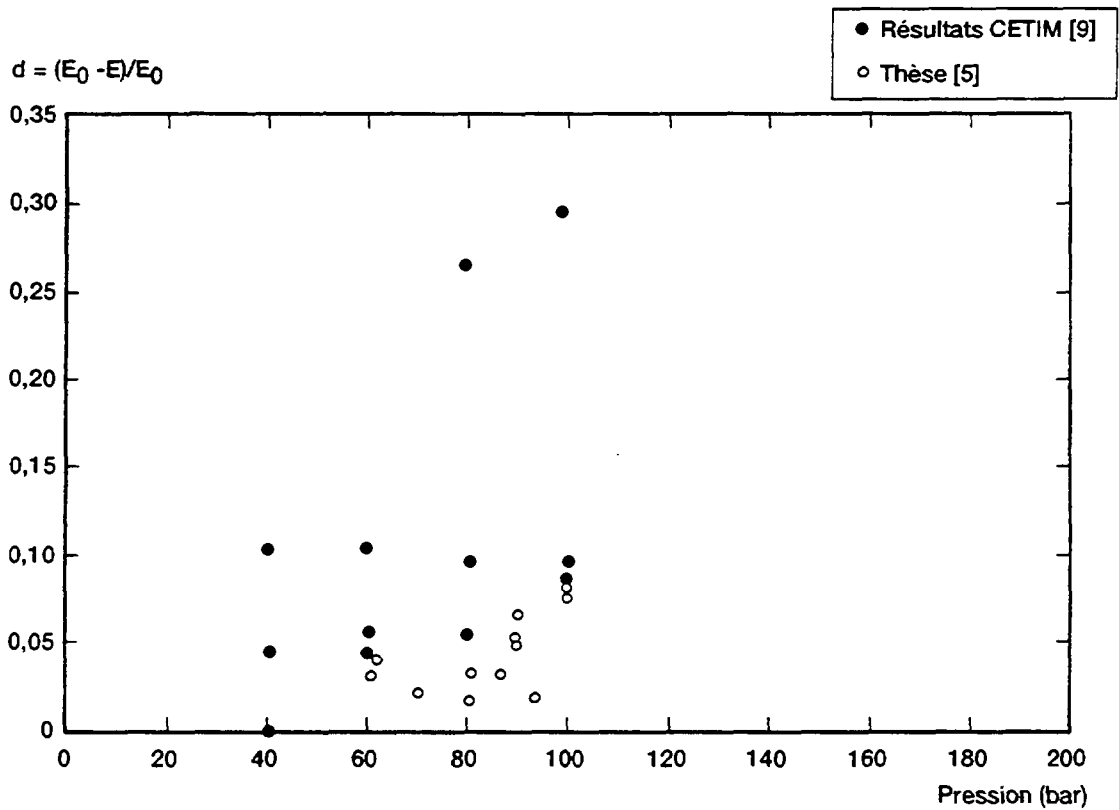
### **5.4 - Corrélation des mesures d'émission acoustique et d'endommagement**

La comparaison des résultats des mesures d'émission acoustique et de l'endommagement met en évidence plusieurs résultats importants :

- pour les tubes A, le dépassement des quatre critères intervient à un niveau de pression voisin du seuil de fissuration de la partie mécanique des tubes, dans l'ordre suivant : 1, 2, 4, 3.

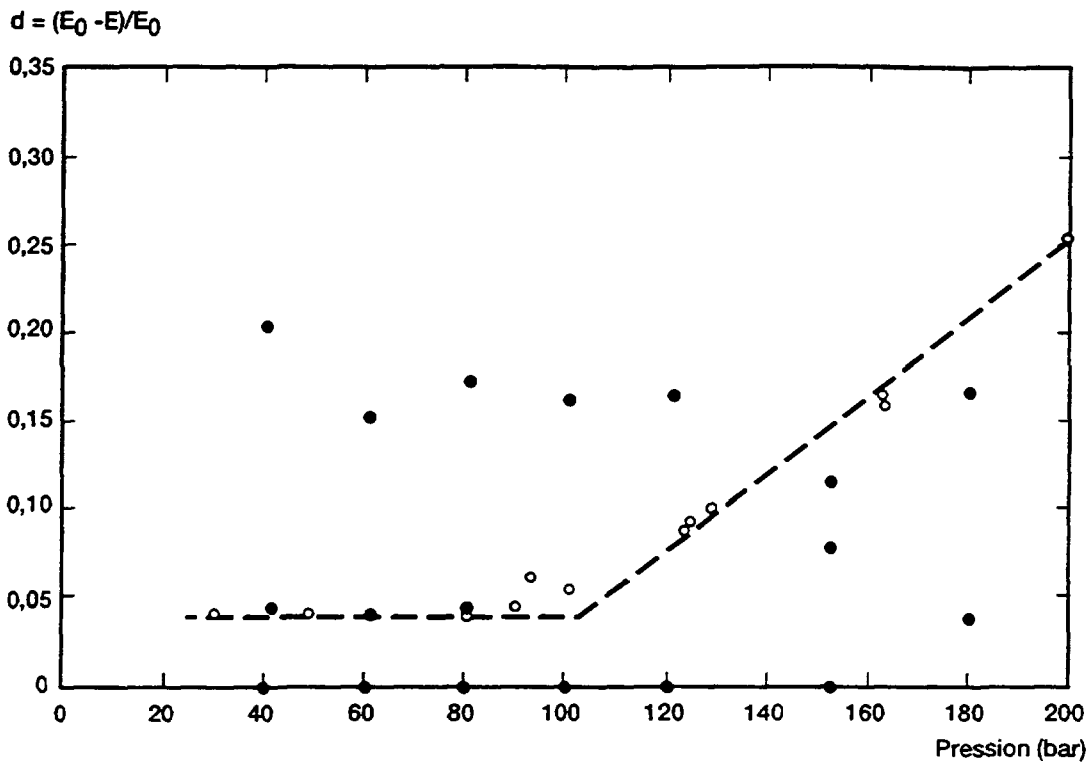


a - Tubes en résine A. Sens longitudinal

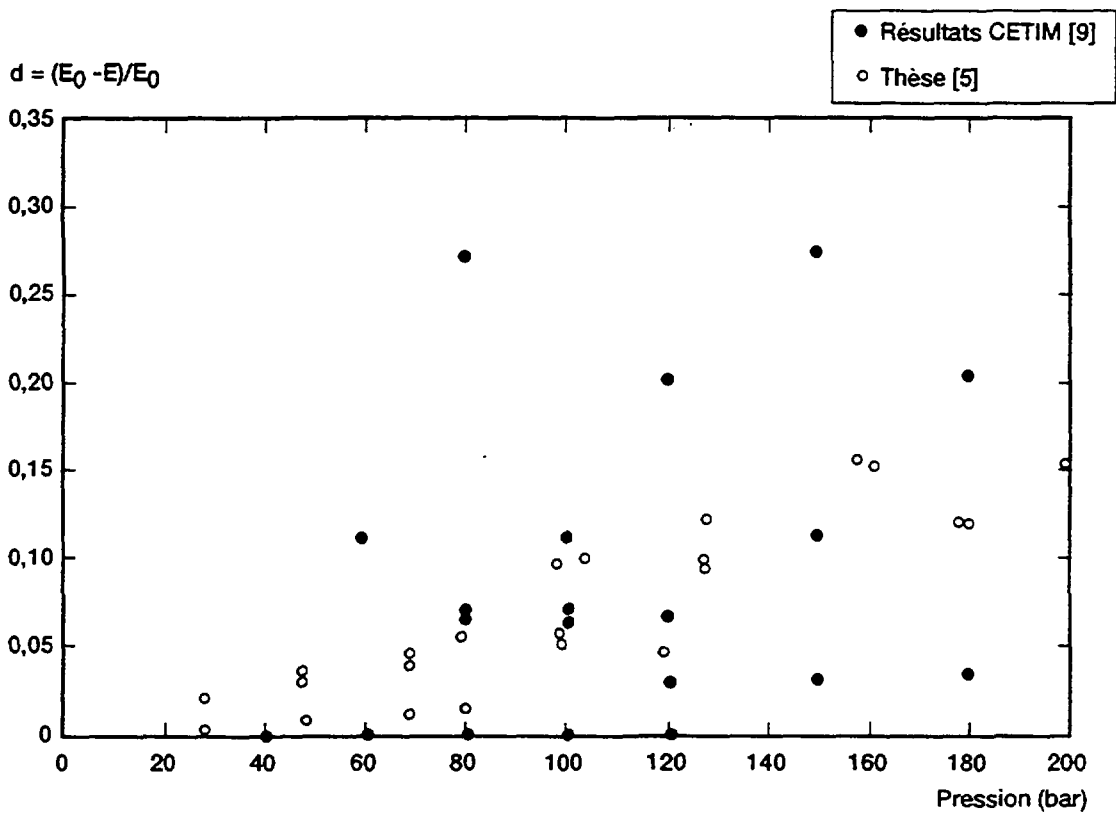


b - Tubes en résine A. Sens diamétral

Figure 14 - Evolution de l'endommagement des tubes A, en fonction de la pression interne, définie à partir de la variation de module élastique.



a - Tubes en résine B. Sens longitudinal



b - Tubes en résine B. Sens diamétral

Figure 15 - Evolution de l'endommagement des tubes B, en fonction de la pression interne, définie à partir de la variation de module élastique.

- pour les tubes B, le dépassement des critères semble suivre une évolution en deux phases, du type de celle du module longitudinal observée dans [5] : les critères 2, 1, puis 4 sont dépassés lors du premier stade, pouvant correspondre à de nombreux "bruits" émis à l'occasion de mouvements au sein du matériau, notamment aux interfaces fibres-matrices, mais sans qu'aucun endommagement macroscopique ne soit visible sur coupe micrographique ; le dépassement du critère 3 (valeur DBC qui correspond à des phénomènes de forte énergie) intervient plus tardivement, aux environs de 100 bar en moyenne, pression proche du seuil d'endommagement macroscopique.

Si on rapproche les résultats obtenus à la fois sur les tubes A et sur les tubes B, il semble qu'on puisse séparer les critères en deux catégories :

- les critères 1, 2 et 4, qui sont dépassés en premier, sont sensibles à des phénomènes non visibles : pour la résine B, vinylester ductile, il peut s'agir de mouvements aux interfaces fibres-matrice ; pour la résine A, polyester fragile, qui ne pourra pas s'accommoder à la déformation sans endommagement, les premiers phénomènes "sonores" sont la fissuration de la matrice. Ces critères apparaissent donc largement influencés par la nature de la résine.

On note que ce sont ces critères qui ont conduit au rebut de tubes sains pour la pression 25 bar (on rappelle que pour les essais menés jusqu'au perlage les paliers de pressions les plus bas ont été de 20 et 40 bars).

- le critère 3, dont le dépassement intervient dans les deux cas à des niveaux de pression pour lesquels une dégradation est visible macroscopiquement sur coupes, peut être considéré comme caractéristique de la présence d'un endommagement généralisé accompagné de phénomènes très énergétiques (propagation de décohésions fibres-matrice, fissurations de la résine,...) ayant une influence sur les caractéristiques élastiques globales du tube.

Ces résultats peuvent être comparés avec ceux des essais de qualification (§ 3.4.1) : aux niveaux de pression considérés, le critère 3 n'est dépassé pour aucun des tubes testés (tableau VI). L'interprétation faite ci-dessus conduirait à supposer que les endommagements pré-existants sur les tubes avec défauts (chocs, défauts de fabrication) ne sont pas suffisamment étendus pour modifier le comportement des tubes.

## 6 - DISCUSSION

L'ensemble des résultats des essais d'émission acoustique montre que la procédure CARP, permet de détecter les défauts et d'apprécier leur nocivité vis-à-vis du comportement en pression des tubes. Il faut cependant noter qu'il a été nécessaire de localiser préalablement l'origine des signaux d'émission acoustique, de manière à éliminer les signaux parasites, qui provenaient, dans le cas des essais qui ont été décrits, des bouchons métalliques collés aux extrémités des tubes ; ces signaux parasites peuvent en effet conduire à des conclusions erronées sur l'état du tube. Cette localisation n'est pas demandée dans la procédure CARP.

On a montré que l'utilisation d'une méthode d'analyse statistique des résultats d'émission acoustique permet d'aboutir à des conclusions similaires au dépouillement classique effectué après localisation des défauts. Elle permet d'aboutir à des informations assez fines concernant notamment le rôle des différents critères. Il semblerait donc envisageable de s'affranchir de la méthode de localisation qui est très difficile à mettre en oeuvre dans le cas de structures en matériau composite, à cause de leur anisotropie.



Les résultats des essais de qualification montrent que les critères 1, 2, et 4 donnent une bonne idée de la gravité des défauts : la faible nocivité de chocs en limite de détection visuelle est apparue clairement, ainsi que la gravité du défaut de manque d'imprégnation d'une nappe de roving par rapport à des délaminages.

Les essais complémentaires d'endommagement, effectués en menant les tubes à des niveaux de pressions très élevés qui conduisent à une altération des caractéristiques élastiques globales du tube, apportent des informations concernant la signification des différents critères de la procédure CARP :

- le critère 3, qui correspond à des phénomènes très énergétiques, semble lié à l'apparition d'un endommagement macroscopique suffisamment développé pour altérer les caractéristiques élastiques globales du tube. Ce critère peut donc donner de bonnes indications sur le niveau d'endommagement mécanique des tubes.

- on constate que les critères 1, 2 et 4, peuvent être largement influencés par la nature de la résine : ils sont en effet sensibles à l'apparition de mouvements à l'échelle microscopique dans le matériau. Ces phénomènes qui apparaissent de manière plus ou moins précoce au cours de la mise en pression des tubes, suivant les caractéristiques viscoélastiques de la résine, peuvent conduire au rebut de certains tubes sains.

Pour appliquer la procédure de qualification, en limitant les risques d'interprétation erronée des critères, il est donc indispensable de bien connaître au préalable les mécanismes d'endommagement du matériau.

Ces essais à pression élevée ont donc montré que l'émission acoustique et en particulier les critères de la procédure CARP donnent de bonnes indications sur l'évaluation de l'endommagement. Cependant dans le cas où l'évaluation de l'endommagement des tubes en service s'avèrerait nécessaire, il y aurait lieu de poursuivre cette étude sur des tubes comportant des endommagements représentatifs de ceux qui sont susceptibles d'apparaître en service (endommagement mécanique, vieillissement hydrolytique...).

## 7 - CONCLUSIONS

Des essais de qualification suivant la procédure CARP (ASTM E 1118) ont été effectués par le CETIM sur des tubes en matériaux composites verre-polyester et verre-vinylester sains, contenant des défauts de choc et des défauts intentionnels de fabrication, jusqu'à une pression maximale de 25 bar.

Ces essais ont montré que la procédure CARP permet de détecter les défauts et d'apprécier leur nocivité vis-à-vis du comportement en pression des tubes : dans la plupart des cas les tubes avec les défauts de choc étudiés, de faible nocivité, n'ont pas été distingués des tubes sains, par contre la gravité du défaut de manque d'imprégnation d'une nappe de roving est clairement apparue.

Des essais complémentaires d'endommagement, ont été effectués sur des tubes mis en pression à des niveaux beaucoup plus élevés. Ils ont montré que l'émission acoustique et en particulier les critères utilisés par la procédure CARP sont susceptibles de donner de bonnes indications sur l'évaluation de l'endommagement. Il serait toutefois intéressant de poursuivre cette étude afin d'évaluer le comportement en émission acoustique de tubes ayant subi un endommagement dans les conditions de service.

## REFERENCES

- [1] C. BOVEYRON - Étude des performances de méthodes de contrôle non destructif appliquées à des tubes en matériaux composites de type résine-fibre de verre contenant des défauts implantés volontairement - 1ère partie  
contrôles visuels et ultrasonores - Note technique n° HT 44/PV D 728-B du 23 Janvier 1990.
- [2] C. BOVEYRON - Étude des performances de méthodes de contrôle non destructif appliquées à des tubes en matériaux composites de type résine-fibre de verre contenant des défauts implantés volontairement - 2-me partie  
contrôles par thermographie infrarouge - Note technique n° HT-44/NEQ 1201-B du 7 Juillet 1991.
- [3] M.F. PAYS - M.C. YRIEIX - Caractérisation de tubes verre-résine de diamètre 100 mm - Note technique à paraître.
- [4] D.PARIS, T.CLEACH - Caractérisation de tubes verre-résine de diamètre 100 mm contenant des défauts de fabrication implantés volontairement - Note technique à paraître.
- [5] I. GHORBEL - Mécanismes d'endommagement des tubes verre-résine pour le transport d'eau chaude : influence de la ductilité de la matrice - Thèse ENSMP - Juillet 1990.
- [6] B. GERVAIS - T. PLOUJOUX - P. VERCAMER - P. SAUVE - Influence du choc sur le comportement mécanique des tubes en matériaux composites : Méthode expérimentale - Revue "COMPOSITES" n°6 , Novembre-Décembre 1988.
- [7] Contrôle par émission acoustique des systèmes de canalisations en plastique renforcé de fibres de verre - Pratique recommandée - Document CETIM 1990 (Traduction française de la norme ASTM E 1118).
- [8] C. HERVE - M. CHERFAOUI - Contrôle par émission acoustique de tubes en matériaux composites de type polyester verre - Procès Verbal n° 4/0174~/42~ 2A+2B+2C du 20 Décembre 1990.
- [9] C. HERVE - M. CHERFAOUI - Contrôle par émission acoustique de tubes en matériaux composites de type résine-fibre de verre et corrélation avec la détermination du seuil d'endommagement - Procès Verbal n° 4/017435/425.IE de Décembre 1991.
- [10] C. HERVE - M. CHERFAOUI - Contrôle par émission acoustique de tubes en matériaux composites de type résine-fibre de verre - Application de l'analyse des données - Procès Verbal n° 4/017435/425.1E du 20 Décembre 1991.
- [11] I. GHORBEL - D. VALENTIN - M.C. YRIEIX - J. GRATIER - Evaluation of the influence of the rheological properties of the matrix on the acoustic emission and damage accumulation in GFRP tubes - Composites Sciences and Technology n°41 - 1991.

ANNEXE A

RESULTATS DES ESSAIS DE QUALIFICATION SUIVANT LE CODE CARP

TABLEAU AI - VALEURS DES CRITERES POUR LES CAPTEURS C1 ET C2 (Tubes de 700 mm) [8]

(Les chiffres en gras indiquent le dépassement des critères)

Repère du tronçon	CRITERE 1 Nombre de salves pendant les deux dernières minutes de palier								CRITERE 2 Nombre total d'alternances				CRITERE 3 VALEUR DBC Energie max.		CRITERE 4 Nbre de salves de forte amplitude A > A <sub>r</sub>		CRITERE 5 RAPPORT FELICITY	
	Valeur du palier (bar)								N <sub>c</sub> moyen	ΣN/N <sub>c</sub>		Rapport E/M		C1	C2	C1	C2	
	12,5		18,75		21,8		25			C1	C2	C1	C2					
	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2										
5'A2	0	0	1	4	2	2	7	6	31460	0,65	0,44	0,84	0,71	8	1	≥ 0,95	≥ 0,95	
5'A3	0	0	0	0	0	0	1	1	29855	0,14	0,12	0,96	0,96	1	1	≥ 0,95	≥ 0,95	
C4'A4 (2J)	0	0	0	2	4	7	10	11	19045	0,80	0,84	0,38	0,42	0	0	≥ 0,95	≥ 0,95	
C4'A7 (2J)	0	0	4	4	6	6	7	7	20295	1,23	0,90	0,95	1,3	8	3	≥ 0,95	≥ 0,95	
C4'A2 (3J)	1	1	1	1	3	2	3	2	25785	0,54	0,40	0,90	0,77	2	1	≥ 0,95	≥ 0,95	
23B7	0	0	0	0	1	0	9	9	24015	0,31	0,20	0,20	0,16	0	0	≥ 0,95	≥ 0,95	
23B9	0	0	0	0	0	0	7	6	35233	0,32	0,12	0,41	0,21	1	1	≥ 0,95	≥ 0,95	
C34B5 (5J)	0	0	2	3	2	2	1	2	39455	0,30	0,30	0,31	0,31	0	0	≥ 0,95	≥ 0,95	
C34B2 (6J)	0	0	0	0	0	0	2	3	43385	0,03	0,02	0,32	0,31	0	0	≥ 0,95	≥ 0,95	
C34B4 (7J)	0	1	5	5	5	5	12	12	36855	0,72	0,70	0,71	0,82	2	3	≥ 0,95	≥ 0,95	
D5B6 (DAC)	0	1	2	2	0	9	22	37	25220/9810	1,07	1,83	0,12	0,10	0	0	≥ 0,95	≥ 0,95	
D8B6 (DC)	0	0	14	1	33	3	71	22	36400	10,16	0,63	0,68	0,08	30	6	≥ 0,95	≥ 0,95	
D12B6 (MIR)	15	13	31	27	59	39	82	59	5370	27,93	8,75	0,18	0,18	130	30	≥ 0,95	≥ 0,95	

TABLEAU AII - VALEURS DES CRITERES POUR LES CAPTEURS C3 ET C4 (Tubes de 700 mm) [8]

(Les chiffres en gras indiquent le dépassement des critères)

Repère du tronçon	CRITERE 1 Nombre de salves pendant les deux dernières minutes de palier								CRITERE 2 Nombre total d'alternances			CRITERE 3 VALEUR DBC Energie max.		CRITERE 4 Nbre de salves de forte amplitude $A > A_T$		CRITERE 5 RAPPORT FELICITY	
	Valeur du palier (bar)								$N_c$ moyen	$\Sigma N/N_c$		Rapport E/M		C3	C4	C3	C4
	12,5		18,75		21,8		25			C3	C4	C3	C4				
	C3	C4	C3	C4	C3	C4	C3	C4									
5'A2	0	1	4	4	3	2	7	7	31460	0,51	0,35	0,81	0,97	7	<b>20</b>	≥ 0,95	≥ 0,95
5'A3	0	0	0	0	0	0	0	1	29855	0,08	0,08	0,43	1,07	0	0	≥ 0,95	≥ 0,95
C4'A4 (2J)	0	0	0	2	0	8	7	10	19045	0,09	0,84	0,08	0,68	0	9	≥ 0,95	≥ 0,95
C4'A7 (2J)	0	0	4	4	6	5	7	7	20295	0,69	0,49	0,97	0,46	7	5	≥ 0,95	≥ 0,95
C4'A2 (3J)	1	1	0	0	2	2	2	3	25785	0,39	0,14	0,85	0,76	3	1	≥ 0,95	≥ 0,95
23B7	0	0	0	0	0	1	11	12	24015	0,29	0,21	0,27	0,39	0	0	≥ 0,95	≥ 0,95
23B9	0	0	0	1	0	1	5	8	35233	0,17	0,16	0,26	0,29	0	2	≥ 0,95	≥ 0,95
C34B5 (5J)	0	0	2	3	2	2	1	2	39455	0,25	0,25	0,33	0,45	1	1	≥ 0,95	≥ 0,95
C34B2 (6J)	0	0	0	0	0	0	3	2	43385	0,04	0,01	0,41	0,62	0	1	≥ 0,95	≥ 0,95
C34B4 (7J)	1	0	4	3	5	3	12	10	36855	0,61	0,20	0,59	0,29	0	0	≥ 0,95	≥ 0,95
D5B6 (DAC)	1	1	12	1	18	2	37	20	13900/5310	1,03	<b>6,80</b>	0,21	0,17	<b>14</b>	1	≥ 0,95	≥ 0,95
D8B6 (DC)	2	3	23	27	50	56	64	118	36400	6,04	5,49	0,42	0,62	35	3	≥ 0,95	≥ 0,95
D12B6 (MIR)	15	<b>16</b>	19	34	42	60	53	84	5370	17,13	<b>18,60</b>	0,17	0,18	30	<b>128</b>	≥ 0,95	≥ 0,95

TABLEAU AIII - VALEURS DES CRITERES POUR LES CAPTEURS C1 ET C2 (Tubes de 2 m) [9]

(Les chiffres en gras indiquent le dépassement des critères)

Repère du tronçon	CRITERE 1 Nombre de salves pendant les deux dernières minutes de palier								CRITERE 2 Nombre total d'alternances			CRITERE 3 VALEUR DBC Energie max.		CRITERE 4 Nbre de salves de forte amplitude $A > A_r$	
	Valeur du palier (bar)								$N_c$ moyen	$\Sigma N/N_c$		Rapport E/M		C1	C2
	12,5		18,75		21,8		25			C1	C2	C1	C2		
	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2							
2A1	0	0	1	0	0	0	1	2	42371	0,15	0,06	0,38	0,35	2	0
2A3	0	0	0	0	0	0	0	0	35736	0,0007	0,0007	0,01	0,01	0	0
5A1	0	0	0	0	0	0	1	0	41544	0,07	0,01	0,14	0,05	0	0
35B1	0	0	1	2	1	0	1	1	28437	0,15	0,13	0,27	0,23	0	1
35B2	0	0	0	1	0	0	2	3	33060	0,18	0,14	0,22	0,18	0	0
35B3	0	0	0	0	2	2	7	8	28970	0,44	0,03	0,45	0,28	3	3
35B4	0	0	0	0	1	0	3	2	29932	0,17	0,63	0,32	0,18	0	0

TABLEAU AIV - VALEURS DES CRITERES POUR LES CAPTEURS C3 ET C4 (Tubes de 2 m) [9]  
 (Les chiffres en gras indiquent le dépassement des critères)

Repère du tronçon	CRITERE 1 Nombre de salves pendant les deux dernières minutes de palier								CRITERE 2 Nombre total d'alternances			CRITERE 3 VALEUR DBC Energie max.		CRITERE 4 Nbre de salves de forte amplitude $A > A_T$	
	Valeur du palier (bar)								$N_c$ moyen	$\Sigma N/N_c$		Rapport E/M		C3	C4
	12,5		18,75		21,8		25			C3	C4	C3	C4		
	C3	C4	C3	C4	C3	C4	C3	C4							
2A1	0	0	1	1	0	0	2	1	42371	0,11	0,06	0,54	0,51	0	0
2A3	0	0	0	0	0	0	1	0	35736	0,003	0,0008	0,034	0,006	0	0
5A1	0	0	0	0	1	7	0	43	41544	0,05	0,72	0,14	0,13	0	0
35B1	2	0	3	0	2	2	1	8	28437	0,22	0,49	0,28	0,20	5	0
35B2	0	0	3	0	1	0	5	4	33060	0,31	0,11	0,38	0,18	2	0
35B3	0	0	2	1	4	3	9	7	28970	0,42	0,25	0,42	0,18	4	3
35B4	0	0	0	0	0	1	3	3	29932	0,08	0,2	0,27	0,18	1	3

TABLEAU AV - ANALYSE SELON LE CODE CARP DES SIGNAUX LOCALISES (Tubes de 700 mm) [8]

Repère du tronçon	CRITERE 1 Nombre de salves pendant les deux dernières minutes de palier				CRITERE 2 Nombre total d'alternances		CRITERE 3 VALEUR DBC Energie max.	CRITERE 4 Nbre de salves de forte amplitude	CRITERE 5 RAPPORT FELICITY
	Valeur du palier (bar)				N <sub>c</sub> moyen	ΣN/N <sub>c</sub>	Rapport E/M	A > A <sub>r</sub>	
	12,5	18,75	21,8	25					
5'A2	0	0	0	3	31460	0,08	0,67	4	≥ 0,95
5'A3	0	0	0	0	29855	0,004	0,03	0	≥ 0,95
C4'A4 (2J)	0	0	0	2	19045	0,1	0,24	0	≥ 0,95
C4'A7 (2J)	0	0	0	1	20295	0,1	0,41	2	≥ 0,95
C4'A2 (3J)	0	0	0	0	25785	0,06	0,14	2	≥ 0,95
23B7	0	0	0	0	24015	0,004	0,04	0	≥ 0,95
23B9	0	0	0	0	35233	0,002	0,02	0	≥ 0,95
C34B5 (5J)	0	0	0	0	39455	0,02	0,21	1	≥ 0,95
C34B2 (6J)	0	0	0	0	43385	0	0	0	≥ 0,95
C34B4 (7J)	0	0	2	2	36855	0,09	0,73	5	≥ 0,95
D5B6 (DAC)	0	0	0	12	17515	0,23	1,14	8	≥ 0,95
D8B6 (DC)	0	0	0	3	36400	0,08	0,27	5	≥ 0,95
D12B6 (MIR)	5	8	21	33	5370	17,5	0,19	216	≥ 0,95



**ANNEXE B**

**RESULTATS DES ESSAIS DE CORRELATION CODE CARP/ENDOMMAGEMENT**

TABLEAU BI - NIVEAUX DE PRESSION CORRESPONDANT AU DEPASSEMENT DES CRITERES  
CAPTEURS C1 ET C2 [9]

Repère du tronçon	CRITERE 1 Pression seuil d'E.A. pendant le palier (bar)		CRITERE 2 Pression pour laquelle $\Sigma N = N_c/2$ (bar)		CRITERE 3 Pression pour laquelle $E_{\max} = M$ (bar)		CRITERE 4 Pression pour dix salves $A > A_r$ (bar)		CRITERE 5 Rapport FELICITY	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2	C1	C2
2A1	40	40	40	43	60	60	47	47	1	1
2A3	40	40	48	42	60	60	50	50	1	1
5A1	40	40	40	41	60	80	40	60	1	1
35B1	40	40	30	43	100	> 100	60	60	0,8	0,8
35B2	40	40	32	40	60	120	60	60	1	1
35B3	40	40	37	38	120	150	40	60	1	1
35B4	40	40	40	40	100	> 120	40	40	1	1

TABLEAU BII - NIVEAUX DE PRESSION CORRESPONDANT AU DEPASSEMENT DES CRITERES  
CAPTEURS C3 ET C4 [9]

Repère du tronçon	CRITERE 1 Pression seuil d'E.A. pendant le palier (bar)		CRITERE 2 Pression pour laquelle $\Sigma N = N_c/2$ (bar)		CRITERE 3 Pression pour laquelle $E_{\max} = M$ (bar)		CRITERE 4 Pression pour dix salves $A > A_T$ (bar)		CRITERE 5 Rapport FELICITY	
	C3	C4	C3	C4	C3	C4	C3	C4	C3	C4
2A1	40	40	40	43	60	60	47	48	1	1
2A3	40	40	50	42	60	60	50	50	1	1
5A1	40	40	40	41	80	80	60	40	1	1
35B1	40	40	40	40	> 100	100	60	60	1	1
35B2	40	40	32	47	100	140	40	60	1	1
35B3	40	40	38	38	120	150	40	60	1	1
35B4	40	40	40	40	100	100	60	40	1	1