

# Caractérisation de résines d'enrobage et d'underfill par ultrasons

E. Martin<sup>1</sup>, M. Saint-Paul<sup>1</sup>, A. Clément<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centre de Recherches sur les Très basses Températures - CNRS  
25, Avenue des Martyrs - BP166, 38042 Grenoble

<sup>2</sup>STMicroelectronics  
12, Rue Jules Horowitz - BP217, 38019 Grenoble

Email: elodie.martin@grenoble.cnrs.fr – michel.saint-paul@grenoble.cnrs.fr - andre.clement@st.com

---

## Résumé

L'augmentation de la complexité de l'encapsulation et la miniaturisation caractérisent l'évolution de la microélectronique. Il est de plus en plus difficile d'analyser les boîtiers à l'aide des techniques simples d'analyse non destructive. Il devient indispensable d'améliorer les méthodes d'analyse des données obtenues par microscopie acoustique. Dans cette perspective, nous avons entrepris de mesurer avec précision la vitesse de propagation et l'atténuation des ondes ultrasonores dans certains matériaux. Nous avons choisi l'exemple d'un circuit intégré comportant deux pastilles assemblées par technique « flip-chip » et encapsulées en boîtier LFBGA. La résine d'enrobage, la résine « underfill » et le substrat d'une des pastilles ont été caractérisés.

Les mesures ont été effectuées dans une grande gamme de fréquences 1-100 MHz et de températures, entre -200 et +200 degrés Celsius. Les propriétés mécaniques, module de Young, et coefficient de Poisson ont été déterminés à partir des mesures de vitesses longitudinales et transverses. L'atténuation des ondes élastiques dans les deux composés organiques, résine d'encapsulation et underfill, est supérieure de deux ordres de grandeur à l'atténuation mesurée dans le silicium et le matériau constituant le substrat de l'autre pastille.

## Mots clés

C.N.D., Flip-Chip, microscopie acoustique, modules élastiques, résines d'enrobage et « underfill ».

---

## Introduction

Dans un souci constant de réduire les dimensions des circuits électroniques, les fabricants de semi-conducteurs rencontrent toujours plus de difficultés lors de l'assemblage final. Les différences entre les coefficients de dilatation thermique des divers matériaux utilisés dans ce type de circuits engendrent de fortes contraintes au niveau des interfaces, et sont la cause principale d'une multitude de défaillances internes (fissures, délaminations, apparition de bulles d'air ou de vide...). Il est donc primordial pour ces fabricants de repérer et évaluer ces types de défauts de manière non destructive.

La *microscopie acoustique*, aujourd'hui largement utilisée dans le domaine de la microélectronique, est la technique de contrôle non invasive qui répond le mieux aux attentes des constructeurs. Elle s'appuie sur la théorie des ondes ultrasonores.

Historiquement, l'inspection acoustique a donc été tout d'abord imaginée pour l'imagerie des défauts internes des circuits. Aujourd'hui, cette technique est de plus en plus utilisée pour la caractérisation des propriétés mécaniques et élastiques des matériaux. A partir de l'estimation des vitesses de propagation et de l'atténuation des ondes ultrasonores, le comportement mécanique d'un matériau, en réponse à une excitation acoustique, peut être intégralement modélisé.

L'objectif de cette caractérisation des matériaux est de parvenir d'une part à déterminer la bande de fréquences utiles à l'investigation des circuits électroniques, mais aussi à comprendre par le biais de modélisations, la forme des signaux obtenus par microscopie acoustique.

Nous présentons ci-après une étude des caractéristiques mécaniques et élastiques de deux classes de matériaux couramment utilisés dans les circuits assemblés par technique « flip-chip » : des matériaux non dispersifs et des résines composites. Tous ces matériaux constituent des noms déposés par des marques déposées.

### Caractérisation de matériaux non dispersifs

Un milieu *non dispersif* est un milieu dans lequel la vitesse de phase est indépendante de la fréquence. C'est donc un milieu dont l'atténuation des ondes acoustiques est extrêmement faible. Afin de visualiser (par microscopie acoustique) des défauts de dimensions infiniment petites dans un matériau, il est *a priori* utile de travailler à haute fréquence. En effet, plus la fréquence de l'onde est élevée, plus la longueur d'onde est faible, et donc plus la résolution devient grande. Un tel comportement est très intéressant en microscopie acoustique car ces types de matériaux permettent l'investigation par microscopie acoustique à l'aide de transducteurs fonctionnant à très haute fréquence.

Deux types de matériaux non dispersifs ont été caractérisés par technique ultrasonore : le silicium dans la direction (100), un substrat type borosilicate, le Borofloat 33 développé par Schott. Chacun des deux échantillons mesurait 700µm d'épaisseur.

Le verre Borofloat 33 est un matériau isotrope. Le silicium est monocristallin. Les ondes longitudinales ultrasonores sont générées dans la direction (100).

L'atténuation des ondes longitudinales a été évaluée en mode transmission à l'aide de deux transducteurs de marque Panametrics. Elle est mesurée à partir de l'amplitude de deux échos (cf. FIG. 1).

La célérité des ondes acoustiques a été déterminée en mode réflexion à l'aide d'un seul transducteur (Panametrics) de fréquence centrale 100MHz. Le capteur et l'échantillon sont immergés dans une cuve d'eau afin d'améliorer l'adaptation d'impédance entre ces deux éléments. L'intercorrélation des deux premiers échos du signal réfléchi (acquis par un voltmètre numérique de marque Tektronix) est déterminée puis dérivée. L'instant  $t_0$  pour lequel la ressemblance entre les deux échos est maximale est l'instant pour lequel la dérivée de l'intercorrélation est nulle. Cet instant permet de déterminer avec précision la vitesse de propagation longitudinale des ondes dans le matériau ( $V = 2d/t_0$ ). Ainsi, obtenons-nous les valeurs suivantes de la vitesse pour le borosilicate Borofloat 33 et pour le silicium (100) :

$$V_{\text{Borofloat}}(f) = 5488 \text{ m/s}$$

$$V_{\text{silicium}}(f) = 8172 \text{ m/s}$$

### Caractérisation de matériaux composites

Une résine composite est caractérisée d'une part, par le type de polymère et de charges entrant dans sa fabrication, mais aussi par la taille, la forme, la répartition et le taux de concentration volumique de ces charges [1-3]. Les résines d'encapsulation des semi-conducteurs et les résines « underfill » sont chargées par des grains de silice amorphe. L'ajout de ce type de particules rigides (coefficient de dilatation thermique de la silice = 9 ppm/°C) conduit à un grand nombre d'effets désirés sur les résines, à savoir un accroissement de leur rigidité globale, une diminution du coefficient de dilatation thermique du composite (coefficient de dilatation thermique de l'époxy = 100 ppm/°C), et une plus grande résistance à la formation d'humidité interne [1]. Cependant, du fait de la grande hétérogénéité de ces résines composites, la propagation des ondes ultrasonores est perturbée. Il en résulte une forte atténuation de l'amplitude de ces ondes [4-5].

Dans cette section, nous présentons les estimations des modules élastiques obtenues expérimentalement sur ces deux types de résines (encapsulation et « underfill »), à partir des seules mesures des vitesses de propagation longitudinale ( $V_l$ ) et transverse ( $V_t$ ). Ces résultats sont confrontés au modèle de Mori-Tanaka [6], qui est fonction du taux volumique de charges, et des valeurs des modules élastiques de l'époxy et de la silice.

#### A Protocole expérimental

Nous avons étudié 13 résines commerciales couramment employées dans l'industrie du semi-conducteur. Ces résines composites proviennent de quatre fabricants différents : Nitto, Sumitomo, Dexter-Hysol et Cookson. Leurs taux volumiques de charge varient de 35% à 82%, et sont répertoriés dans le tableau TAB. I [7].

La résine d'encapsulation HC 100 développée par Nitto présente la plus grande concentration volumique de charges des résines testées (82%). Nous rappelons que la compacité maximale que l'on peut atteindre pour des charges sphériques de diamètre uniforme, obtenue pour une maille hexagonale, vaut 74%. Ceci traduit deux faits : la distribution de la taille des charges dans la HC 100 n'est certainement pas uniforme, et la géométrie des charges est vraisemblablement variée. L'analyse d'une coupe de cette résine réalisée au MEB montre que les charges sont de formes sphérique et ellipsoïdale. D'autre part, les dimensions de ces charges sont caractérisées par une large distribution de 1 à 100µm, avec une taille moyenne de l'ordre de 10µm. La plus faible concentration volumique de charge (35%) est obtenue pour la résine Staychip 3082 élaborée par Cookson. La forme des charges de cette résine dite « underfill » est sphérique, et la distribution des tailles des grains de silice est inférieure à 10µm avec une taille

moyenne de 2.5µm.

Les mesures de célérité et d'atténuation ont été réalisées dans une gamme étendue de températures [-200°C ; +200°C], et dans la bande de fréquences [1MHz ; 100MHz] grâce à divers transducteurs d'ondes longitudinales et transverses de marque Panametrics. Les acquisitions ont été effectuées en mode transmission. A basses et moyennes températures (inférieures à 120°C), les transducteurs étaient directement collés sur les faces parallèles de l'échantillon. A très hautes températures, les transducteurs étaient liés aux surfaces de l'échantillon par l'intermédiaire de barres d'innox. Le contrôle de la température a été effectué par une résistance de platine. Les variations de vitesse ont été mesurées avec une précision de 10<sup>-4</sup>, par détection de cohérence de phase à 13MHz.

### B Modules élastiques

Les modules élastiques (B), de cisaillement (G), de Young (E), et le coefficient de Poisson (ν) ont été déterminés à partir des mesures de V<sub>l</sub> et V<sub>t</sub> par les relations suivantes :

$$B = \rho(V_L^2 - 4V_T^2 / 3) \quad (1)$$

$$G = \rho V_T^2 \quad (2)$$

$$E = G \left[ 3 - 4 \frac{V_T^2}{V_L^2} \right] / \left[ 1 - \frac{V_T^2}{V_L^2} \right] \quad (3)$$

$$\nu = \left[ 1 - 2 \frac{V_T^2}{V_L^2} \right] / \left[ 2 - 2 \frac{V_T^2}{V_L^2} \right] \quad (4)$$

Les valeurs des modules élastiques B, G, E et ν sont reportées dans le tableau TAB. 1. Les valeurs des modules élastiques augmentent avec le taux volumique de charge, ce qui est conforme au comportement prédit par la théorie [6]. De nombreux modèles ont été élaborés pour décrire le comportement des modules élastiques d'un matériau composite. Nous retiendrons en particulier les relations de Mori-Tanaka [6], liant les modules élastiques d'un composite à ceux de l'époxy (B<sub>1</sub>, G<sub>1</sub>, ν<sub>1</sub>), de la silice (B<sub>2</sub>, G<sub>2</sub>) et de la fraction volumique de charge x.

$$B_{MT} = B_1 \left[ 1 + \frac{x(B_2 - B_1)}{(1-x)\alpha(B_2 - B_1) + B_1} \right] \quad (5)$$

$$G_{MT} = G_1 \left[ 1 + \frac{x(G_2 - G_1)}{(1-x)\beta(G_2 - G_1) + G_1} \right] \quad (6)$$

$$E_{MT} = G_{MT} \frac{9B_{MT}}{3B_{MT} + G_{MT}} \quad (7)$$

Où α et β sont des constantes définies par :

$$\alpha = \frac{1}{3} \frac{1 + \nu_1}{1 - \nu_1} \quad \beta = \frac{2}{15} \frac{4 - 5\nu_1}{1 - \nu_1} \quad (8)$$

Les modules élastiques B, G, E de ces différentes résines, déterminés expérimentalement, vérifient les tendances prédites par le modèle de Mori-Tanaka (cf. FIG. 2).

### C Dépendance fréquentielle

Un matériau *dispersif* est un milieu dans lequel la vitesse de phase varie avec la fréquence. Les matériaux composites que nous avons étudiés sont dispersifs (cf. FIG. 1). La résine d'encapsulation HC100 et la résine « underfill » Staychip 3082 présentent chacune une croissance de la vitesse en fonction de la fréquence. La dépendance fréquentielle de la vitesse peut être décrite par la relation de Kramers-Kronig [8], liant la célérité des ondes acoustiques dans un matériau à son atténuation α.

$$V(f) = V(f_0) + \frac{V(f_0)^2}{\pi^2} \int_{f_0}^f \frac{\alpha(u)}{u^2} du \quad (9)$$

Cette équation est valable pour des systèmes linéaires. Les effets non linéaires d'un milieu se traduisent par l'apparition de composantes fréquentielles au moins doubles de celle du fondamental [9]. L'énergie de tels harmoniques a été mesurée pour les résines HC 100 et Staychip 3082. Elle s'est avérée être inférieure à 3% de l'énergie de la composante fondamentale, de sorte que nous pouvons considérer nos matériaux linéaires.

La dépendance en fréquence de l'atténuation a été évaluée à partir des données relevées pour la résine HC100 et Staychip 3082. Elle s'est révélée de la forme  $\alpha = A_1 f + A_2 f^2$ .

La contribution linéaire en fréquence de l'atténuation est attribuée aux relaxations viscoélastiques du polymère dans un composite. Cette dépendance linéaire est prépondérante à basse fréquence ( $f < F_{B1} = 20\text{MHz}$  pour la résine HC100 et  $f < F_{B2} = 50\text{MHz}$  pour l'underfill Staychip 3082). Le coefficient A<sub>1</sub> diminue avec la température.

La contribution quadratique en fréquence de l'atténuation est attribuée à la diffusion de l'onde ultrasonore sur les grains de silice. Cette tendance correspond au régime stochastique, i.e. lorsque l'ordre de grandeur du diamètre D des billes de silice est comparable à celui de la longueur d'onde λ ( $\lambda \approx 2\pi D$ ) [10]. Le coefficient A<sub>2</sub> est indépendant de la température,  $A_2 = \Sigma \dot{D}$  où Σ est le coefficient de diffusion stochastique et  $\dot{D}$ , le diamètre moyen des billes. Pour les résines HC 100 et Staychip 3082, nous obtenons respectivement : Σ = 0.2 et 0.4 dB/MHz<sup>2</sup>mm<sup>2</sup> pour un diamètre moyen  $\dot{D} = 2.5$  et 10µm.

L'atténuation des ondes acoustiques dans ces deux matériaux peut donc être approchée par un polynôme

d'ordre 2 en f. Ainsi, obtenons-nous les expressions suivantes de l'atténuation pour la résine d'encapsulation HC 100 et pour la résine « underfill » Staychip 3082 :

$$\alpha_{\text{HC100}}(f) = 2.31 \times 10^{-2} f + 5.40 \times 10^{-3} f^2 \text{ dB/mm}$$

$$\alpha_{\text{Staychip}}(f) = 6.91 \times 10^{-2} f + 5.99 \times 10^{-3} f^2 \text{ dB/mm}$$

L'exploitation des courbes d'atténuation exprime toute la difficulté d'observer des défauts internes aux circuits à haute fréquence ; les résines d'encapsulation et d'underfill semblant se comporter comme des filtres passe-bas.

#### A. Dépendance en température

La dépendance en température de la célérité et de l'atténuation des résines d'encapsulation HC 100 et « underfill » Staychip 3082 est présentée respectivement sur les figures FIG. 3 et FIG. 4.

#### 1. Basses températures

Les processus de relaxations thermiques (relations 10 et 11), liés au mouvement des particules dans un polymère, sont à l'origine des variations de vitesse de propagation et d'atténuation des ondes ultrasonores [11]. Le refroidissement du polymère induit une augmentation de la célérité et une diminution de l'atténuation.

$$V(\omega) = V(\infty) - \frac{V(\infty) - V(0)}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (10)$$

$$\alpha(\omega) = \frac{V(\infty)^2 - V(0)^2}{2\rho V(0)^3} \frac{\omega^2 \tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (11)$$

Où  $\tau$  représente la constante de temps de relaxation définie par  $\tau = \tau_0 \exp(E/k_B T)$ , E énergie d'activation,  $k_B$  constante de Boltzman La résolution de ces équations conduit à estimer les valeurs des paramètres  $E/k_B$  à 2700 K et  $\tau_0$  à  $3 \cdot 10^{-2}$  s pour les résines HC 100 et Staychip 3082.

#### 2. Hautes températures

Le comportement des modules élastiques de l'underfill Staychip 3082 à haute température est similaire à ceux obtenus par Rao [2] sur d'autres résines « underfill » par analyse dynamico-mécanique. Autour de la transition vitreuse ( $T_v$ ), déterminant la température pour laquelle le polymère passe d'un état vitreux à un état de liquide visqueux (resp. 158°C pour HC 100 et 125°C pour Staychip 3082), le comportement des deux résines peut être décrit par un processus thermiquement activé [4]. Le paramètre  $E/k_B$  vaut respectivement 6000K pour HC 100 et 5000K pour Staychip 3082 et la constante de temps  $\tau_0$  est de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-13}$  s.

## Conclusion

Nous avons présenté une étude des principaux types de matériaux utilisés en microélectronique dans les circuits assemblés par technique « flip-chip ». Les vitesses de propagation d'onde ultrasonore et les atténuations de ces divers matériaux ont été caractérisées. L'atténuation et la célérité des ondes acoustiques dans les résines composites dépendent à la fois de la température et de la fréquence de l'onde ultrasonore.

L'observation du comportement général des résines composites est intéressante quant au domaine de fréquences utiles à l'investigation d'un circuit par microscopie acoustique. Elle révèle l'absence d'intérêt de travailler à des fréquences supérieures à 50MHz.

La connaissance de ces caractéristiques ( $\alpha$  et V) est essentielle à la modélisation des signaux issus d'un microscope acoustique, afin de détecter par la suite la présence d'éventuels défauts internes.

## Références

- [1] J. Qu, C.P. Wong, IEEE Trans. on Components and Packaging Technology, **25**, (2002) 53.
- [2] Y. Rao, S. H. Shi C. P; Wong, IEEE Trans. on Components and Packaging Tech. **23**, (2000) 434.
- [3] M.T Goosey, in "Plastic for Electronics", edited by Goosey (Elsevier App. Sci. Pub., London 1985).
- [4] Y. S. Lipatov, in "Advances in Polymer Science" **22** Phys. Chemistry (Springer Verlag Berlin 1977 ) p. 1.
- [5] G. Mikolajczak, J.Y Cavaille, G.P. Johari, Polymer **28**, (1987) 2023.
- [6] J. Abouti, in "Mechanics of composites Materials Studies in App. Mech." (Wiley New-York 1991).
- [7] A Clément, M. Saint-Paul, J. Matter Sci.: Mater. Electronics **13** (2002) 21.
- [8] M. O'Donnell, E.T. Jaynes, J.G. Miller, J. Acoust. Soc. Am **69** (1981) 696.
- [9] Kyung-Young Jhang, IEE Trans. Ultrason. Ferroelec; Freq. Control. **47** (2000) 541.
- [10] E.P. Papadakis, J. Acous. Soc. Am. **37** (1965) 703.
- [11] I Perepechko, in "Low Temperature Properties of Polymers Mir" (Moscow Pergamon Press 1977).

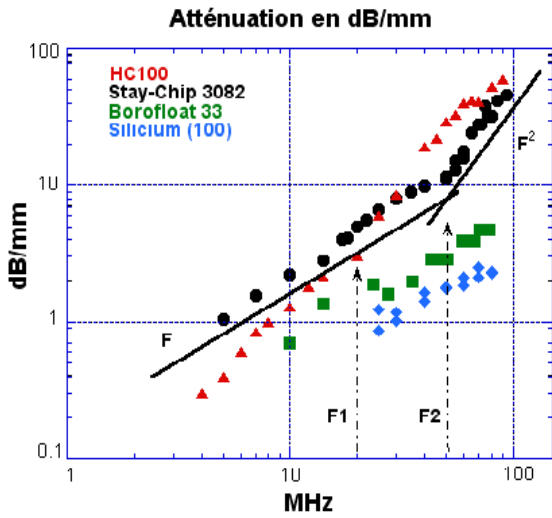


FIG. 1 : Dépendance fréquentielle de l'atténuation des ondes ultrasonores longitudinales de deux matériaux non dispersifs (♦ silicium (100), ■ Borofloat 33) et de deux résines composites (▲ HC 100, ● Staychip 3082)

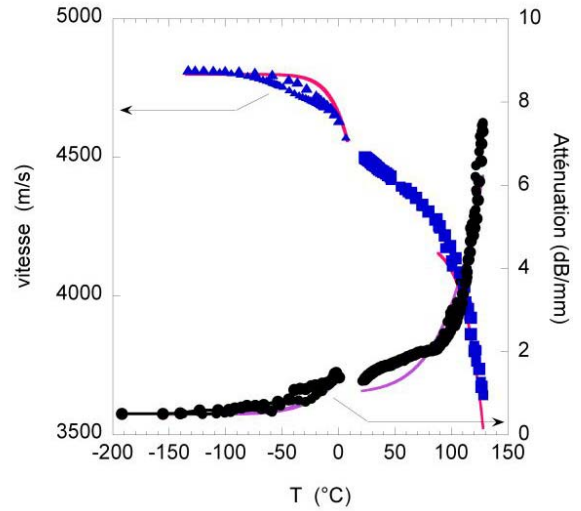


FIG. 3 : Dépendance en température de la vitesse et de l'atténuation des ondes ultrasonores longitudinales de la résine HC 100. Fréquence de mesure 12 MHz. Courbes en trait plein calculées à partir des équations 10 et 11.

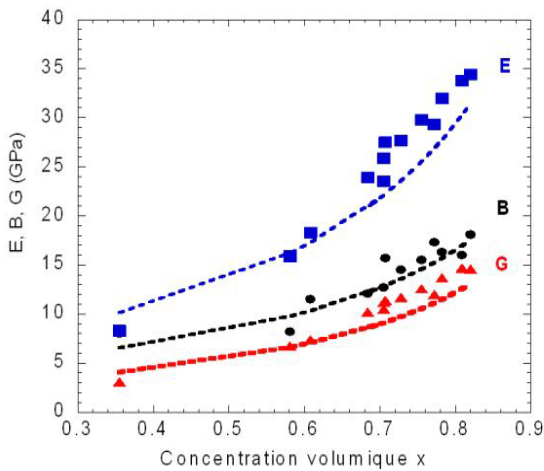


FIG. 2 : Module d'Young E (■), module massique B (●) et module de cisaillement G (▲) de résines composites. Traits pointillés : modèle de Mori-Tanaka (équations 5-7)

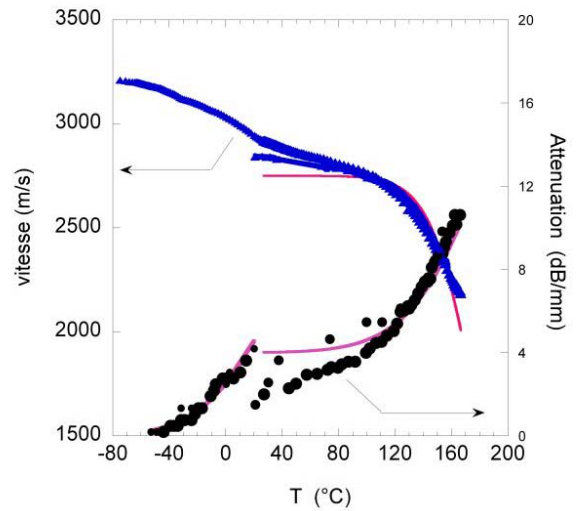


FIG. 4 : Dépendance en température de la vitesse et de l'atténuation des ondes ultrasonores longitudinales de la résine Staychip 3082. Fréquence de mesure 12 MHz pour T inférieure à 0°C et 8MHz au dessus de 0°C. Courbes en trait plein calculées à partir des équations 10 et 11.

Composites	Type	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\nu$	$V_L$ (m/s)	$V_T$ (m/s)	E (Gpa)	G (Gpa)	B (Gpa)	$\nu$
<i>Epoxy</i>		1.2	-	2400	1320	5.1	2.1	4	0.33
Staychip 3082		1.5	0.355	2850	1430	8.32	3.09	8	0.33
6300HA	OCN	1.79	0.581	3100	1940	15.9	6.76	8.2	0.18
MP190ML	OCN	1.85	0.608	3400	2000	18.3	7.4	11.5	0.24
6600RA	DCP	1.9	0.705	3570	2350	23.5	10.5	10.2	0.12
7320CR	BP	1.9	0.684	3680	2320	23.9	10.2	12.1	0.17
MP8000	OCN	1.93	0.707	4000	2430	27.5	11.4	15.7	0.21
7025A	DCP	1.97	0.728	3910	2440	27.7	11.7	14.5	0.18
MG47F	BP	1.96	0.755	4060	2540	29.8	12.6	15.5	0.18
7351LS	BP	2.01	0.772	4070	2446	29.3	12	17.3	0.22
MP7420EX	BP	2.02	0.809	4200	2700	33.8	14.7	16	0.15
HC100	PF	2.02	0.82	4500	2680	34.4	14.6	18.1	0.18
<i>Silica</i>		2.2	-	5968	3763	72.9	31.2	36.8	0.17

**TAB. 1 : Valeurs des modules de Young, massique et de cisaillement de différentes résines composites**

## Biographie

**E. Martin** Doctorante au Centre de Recherches sur les Très Basses températures (bourse BDI Entreprise cofinancée par STMicroelectronics et le CNRS) Ingénieur ENSIEG (INPG) spécialité Traitement du Signal et des Images

### M. Saint-Paul

(Enseignant-chercheur)

Professeur à l'Université Joseph Fourier - Centre de Recherches sur les Très Basses températures CNRS Grenoble

Responsable de la formation Master Professionnel Acoustique Ultrasonore (Physique et Ingénieries UFR de Physique).

Il participe depuis 1995 en collaboration avec le laboratoire de STMicroelectronics du site de Grenoble à l'analyse non destructive de boîtiers électroniques à l'aide de la microscopie acoustique.

Cette collaboration s'est manifestée par 6 stages Master et 2 thèses, une soutenue en 1999 et une en cours.

### A. Clément

STMicroelectronics, Grenoble

Automotive Group, responsable Qualité & Fiabilité BE

STMicroelectronics Corporate Quality Expert

Président UTE-UF47. Membre IEC TC47/WG2.

Vice-président PC2A ([www.sansplomb.org](http://www.sansplomb.org))

Collaboration étroite dans le domaine de la microscopie acoustique et l'analyse non destructive, avec l'Université Joseph Fourier et le CNRS-CRTBT de Grenoble depuis 1995 (6 stages et 2 thèses dont une en cours).

Participation à un projet européen permettant de définir des méthodes et outils de calibration des microscopes acoustiques (présentation EMPC 2005, Brugge, juin 2005).