# Partie 6

# Intégration et perspectives d'évolution des dispositifs existants

# Fiche de synthèse

# **Contributeurs :**

*Chapitre 1 :* Caractérisation et modélisation des matériaux *Plastic Omnium / Faurecia* 

Chapitre 2 : Modélisation de solutions et évolution

Plastic Omnium / Faurecia / UDS / Ifsttar-LBA

# Questions posées

Qu'il s'agisse d'un impact de la tête sur le capot ou le pare brise, ou du contact jambe face avant du véhicule, il est essentiel d'optimiser à la fois la dissipation de l'énergie au choc et l'enfoncement des structures afin de limiter le risque lésionnel. Cela présuppose d'avoir une excellente connaissance :

- des matériaux utilisés de sorte à en établir une modélisation fine et fiable,

- des structures (face avant et capot) qui dans leurs design (véhicule piétonnisés ou non, ...) vont contribuer significativement à la dissipation de l'énergie au choc..

Ainsi, l'objectif de cette tâche sera de modéliser puis de caractériser expérimentalement les matériaux composites ainsi que les structures du véhicule. La finalité étant d'optimiser ces dernières non seulement vis-à-vis de critères normatifs actuels mais également vis-à-vis de critères biomécaniques.

# Chapitre 1 : Caractérisation et modélisation des matériaux

Deux matériaux particulièrement utilisés dans la conception des faces avant des véhicules ont été identifiés :

# SMC (Thermodurcissable renforcé fibres de verre) Sabic P108 (Polypropylène non chargé)

L'enjeu a été ici de combiner simulation numérique et approche expérimentale pour caractériser plus finement le comportement de ces matériaux (de référence). Les travaux réalisés ont porté sur différents domaines de sollicitation (depuis le vibratoire jusqu'au crash).

## <u>Résultats marquants :</u>

- Données expérimentales de référence jusqu'à la rupture des matériaux Sabic P108 et SMC

- Modélisation fine sous Radioss de ces matériaux

# Chapitre 2 : Modélisation de solutions et évolution

Les outils d'analyse et d'évaluation des lésions de la tête ont été appliqués au design d'un capot de véhicule. S'agissant du membre pelvien, les travaux ont été focalisés sur l'évaluation du gain de protection offert par la piétonisation d'un véhicule et dans un deuxième temps sur les pistes d'optimisation de la face avant du véhicule.

#### **Résultats marquants :**

- Un capot avec une peau extérieure acier ou aluminium couplée à une doublure composite utilisant les matériaux caractérisés s'avère opportun pour améliorer la protection de la tête des piétons en cas de choc par rapport aux solutions conventionnelles.

- La piétonisation d'un véhicule montre un gain significatif de protection du piéton. La modification du design de la face avant du véhicule (géométrie et propriétés mécaniques) contribue à minimiser le risque de blessure.

# Sommaire

Chapitre 1		383
Caractérisat	ion et modélisation des matériaux?	383
1.	Thermodurcissable renforcé fibres de verre (SMC)	383
1.1.	Caractérisation du SMC	383
1.2.	Construction d'une loi calcul matériau pour Radioss	390
1.3.	Caractérisation du SMC à renfort continu	418
2.	Cas du Sabic P108 (Polypropylène non chargé)	445
2.1.	Caractérisation complète du P108	445
2.2.	Optimisation d'une structure en P108	459

# Chapitre 2

Modélisation de solutions et évolution	474
I. Modélisation de solution et évolution concernant l'impact tête	474
II. Comment la piétonisation de véhicule et son optimisation peut-elle din	iinuer la
vulnérabilité du piéton.	479

# **Chapitre 1**

# Caractérisation et modélisation des matériaux?

# 1. Thermodurcissable renforcé fibres de verre (SMC)

# 1.1. Caractérisation du SMC

Le SMC étudié (Sheet Mold Compound) est fabriqué par MCR (Mixt Composites Recyclables) filiale d'Inoplast, l'entité thermodurcissable du groupe Plastic Omnium.

Ce SMC est constitué d'une matrice polyester à laquelle s'ajoutent des charges (craies, billes de verre) et des additifs ainsi que des fibres de verres renforçantes de 25mm de longueur. La proportion de ces fibres au sein de la matrice est de 30 %.

Les billes de verre creuses confèrent à ce SMC une densité faible (1,52) raison pour laquelle nous l'avons choisi dans le contexte actuel d'allègement des véhicules automobiles.

Ce SMC basse densité est obtenu par moulage par compression et sa fabrication requiert deux étapes essentielles. La première étape consiste à élaborer un mât pré-imprégné par la projection de fibres de verre coupées dans la résine thermodurcissable chargée qui se présente sous forme de pâte. Deux films en polyéthylène sont utilisés de part et d'autre afin de contenir la composition du matériau lors du calandrage. Le produit « semi fini » ainsi élaboré prend la forme de ruban épais de feuilles ayant un aspect malléable. Le semi produit est ensuite enroulé en bobines puis stocké pour mûrissement.

La seconde étape est la mise en forme. La pièce se fait par compression d'une ou plusieurs couches (flans) de pré-imprégné dans un moule. Pendant la compression, le moule est chauffé sous pression et la résine flue dans le moule pour remplir la cavité puis elle polymérise.



Figure 1 : procédé de fabrication du SMC

Un premier lot matière a été produit. Des flans ont été découpés dans le rouleau à  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$  et  $90^{\circ}$  par rapport au sens d'enroulement du rouleau<sup>1</sup> et moulés en plaques de référence dans lesquelles nous avons taillé des éprouvettes pour réalisation d'essais de caractérisation.



# 1.1.1 Partie expérimentale : traction quasi statique

Des éprouvettes rectangulaires de 250mm x 25mm ont été réalisées dans des plaques non fluées d'épaisseur 2,1mm et testées en traction quasi-statique à v=2mm/min (ISO 527-4).



<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Nota : le but est de vérifier si le processus de fabrication (chute aléatoire de la fibre de verre sur le polyester lui-même entrainé par un tapis roulant) conduit après moulage sans fluage à un matériau isotrope plan.

Figure 3 : Eprouvettes pour composites type 3 (avec talons)



Figure 4 : Profits de rupture des éprouvettes







$$E(iso) = \frac{E(0^{\circ}) + 2E(45^{\circ}) + E(90^{\circ})}{4}$$

E(iso) = 7330 MPa

On prendra: 
$$E(iso) = 7300MPa$$



Figure 6 : Caractéristiques mécaniques mesurées

Conclusion : Présence d'une orientation privilégiée des fibres (sens rouleau) dans les plaques dites ''non fluées''. Cette orientation reste cependant faiblement marquée.

## 1.1.2 Partie expérimentale : Flexion 3 points

Des éprouvettes rectangulaires de 50mm x 25mm ont été réalisées dans des plaques non fluées d'épaisseur 2,1mm et testées en flexion 3 points quasi-statique à v=2mm/min (ISO 178) :



**Figure 7 : Présentation et conditions aux limites** 



Figure 8 : Courbes d'essais (moyennes par direction) jusqu'à rupture :

Orientation	N° éprouvette	Module en MPa SMC Non flué
	1	6438
	2	5842
0°	3	6552
Sens rouleau	4	6979
[]]]	5	6492
Moj	yenne	7814±9%
	1	
	2	
45°	3	
	4	
	5	
Moj	yenne	
	1	5347
	2	
90°	3	5874
1	4	5669
1777 -	5	5464
Mo	yenne	6537 ± 5%

Figure 9 : Modules en flexion calculés entre 0,05% et 0,25% de déformation

# Là aussi, présence d'une orientation privilégiée des fibres (sens rouleau) dans les plaques dites ''non fluées''. Cette orientation reste cependant faiblement marquée.

# 1.1.3 Partie expérimentale : Choc multi-axial

## Géométrie des éprouvettes

Les éprouvettes sont des plaques carrées de 100x100 mm<sup>2</sup> réalisées dans des plaques non fluées d'épaisseur 2,1mm. La sollicitation étant multi axiale, les éprouvettes sont découpées sans prendre en compte les directions évoquées précédemment.

# <u>Montage</u>

Nous utilisons la machine de choc multi axial disponible chez Plastic Omnium. Elle est composée d'un impacteur cylindrique surmonté d'une demi-sphère :

- $\Rightarrow$  Diamètre demi-sphère = 20 mm
- $\Rightarrow$  Masse totale de l'impacteur = 12.8 kg

L'éprouvette est en partie encastrée dans des mors, seule une zone centrale circulaire reste libre pour l'impact :

- $\Rightarrow$  Diamètre zone libre = 40 mm
- ⇒ L'impacteur est lâché en chute libre d'une hauteur H définie par l'utilisateur en fonction de la vitesse d'impact désirée :
- $\Rightarrow$  Vimpact =  $\sqrt{2gH}$



Figure 10 : conditions expérimentales

Pour le SMC à caractériser nous testons plusieurs vitesses d'impact afin de définir :

- ⇒ la vitesse minimale à partir de laquelle il y a début d'endommagement du matériau
- ⇒ la vitesse maximale pour laquelle il a y perforation totale de la plaque



Figure 11 : Résultats expérimentaux

# 1.1.4 <u>Discussion – Conclusion sur les essais de traction quasi statique, Flexion 3</u> points et Choc multi-axial

L'ensemble de ces essais nous ont permis de qualifier le comportement du matériau en traction, en flexion et en rupture.

Sur la base de ces données à une première identification desdes grandeurs caractéristiques de ce matériau a été réalisée pour lequel nous avons bâti un 1<sup>er</sup> modèle de loi numérique que nous faisons évoluer en corrélant les essais de caractérisation par méthode inverse.

						BUDGET					
Nombre Essais d'éprouvettes fluées		Nombre es d'prouvettes non fluées		e ttes es	Protocole	Dimensions éprouvettes (mm)	Découpe éprouvettes	Essais	Délai		
0° 45° 90° 0° 45° 90° vs sens rouleau					45° ns roi	90° Jleau					
Traction quasi-statique 2mm/min (jusqu'à rupture)	5	5	5	5	5	5	IS O 527-4 (éprouvette type 3 avec mors) pour composite Machine POAES : 50 mm/min max Extenso clip pour module / F + Déplacement barre + mesure laser 2 bandes pour rupture	250x25x2,5 pour fluées 250x25x2,1 pour non fluées	J et d'eau, laser Fraisage si n'altère pas éprouvette (méca, t°C)	POAES	POAES
Traction en vitesse (jusqu'à rupture)											
0.01 s <sup>-1</sup>	5	5	5	5	5	5	IS O 8256 traction choc	idem traction statique :			
0.1 s <sup>-1</sup>	5	5	5	5	5	5	=> éprouvette type 5 (largeur au centre 10mm	250x25x2,5 pour fluees	Let d'eau laser		
1 s <sup>-1</sup>	5	5	5	5	5	5	=> NOK vs SMC 25mm longueur fibre)	ou	Fraisage si n'altère pas	Vidéo-acquisition	
10 s <sup>-1</sup>	5	5	5	5	5	5	a adapter avec largeur min = 25mm Attention aux glissement / runture dans les	adaptation de la type 5 (iso	éprouvette (méca, t°C)		
50 s <sup>-1</sup>	5	5	5	5	5	5	mords	8256) => 80x30 (réduc ép			
							ļ.	[Jsmm]			
Choc multi axial (CMA)	3 v répét	vitesse tées 5	es fois	3 répé	vitess tées 5	es fois	Chute de bille sur plaque : perforation + recherche énergie limite de perforation	100x100x2,5 pour fluées 100x100x2,1 pour non fluées	S cie à bande, fraisage	POAES	POAES
Flexion 3 points 2mm/min (jusqu'à rupture)	5	5	5	5	5	5	ISO 178 pour composites Mesure effort + déplacement bille Longueur=20 x épaisseur Distance entre appuis = 17 x épaisseur	50x25x2,5 pour fluées 50x25x2,1 pour non fluées Distance entre appuis = 42mm	J et d'eau, laser Fraisage si n'altère pas éprouvette (méca, t°C)	POAES	POAES
							ASTMD 5270M 05 / éprouvottor 90v25 mm	1		1	
C is aillement s tatique (2mm/min)	5	5	5	5	5	5	avec entaille au centre ou autre à définir (montage mords à fabriquer 2)	80x25x2,5 pour fluées 80x25x2,1 pour non fluées Ménager faible zone utile	J et d'eau, laser Fraisage si n'altère pas éprouvette (méca, t°C)		
Cisaillement dynamique											
0,01 s <sup>-1</sup>	5	5	5	5	5	5					
0,1 s <sup>-1</sup>	5	5	5	5	5	5			Jet d'eau, laser		
1 s <sup>-1</sup>	5	5	5	5	5	5	Idem statique ?	Idem statique ?	Fraisage si n'altere pas		
50 s <sup>-1</sup>	5	5	5	5	5	5			epiouveile (meca, i c)		
			1				ļ [				
Compression statique (2mm/min ?)	5	5	5	5	5	5	ASTM D695M-91 ou autre à définir (montage mords à fabriquer ?)	ASTM D695M-91 non dispo @ POAES (vu biblio éprouvettes zone utile 20x20mm)	J et d'eau, laser Fraisage si n'altère pas éprouvette (méca, t°C)		
Compression dynamique											
0,01 s <sup>-1</sup>	5	5	5	5	5	5					
0.1 s <sup>-1</sup>	5	5	5	5	5	5	1		Jet d'eau, laser		
1 5 1	5	5	5	5	5	5	Idem statique ?	Idem statique ?	Fraisage si n'altère pas		
50 s <sup>-1</sup>	5	5	5	5	5	5	1		eprouvelle (meca, CC)		
Délaminage	QS + répét	2 vite tées 5	sses fois	- v répé	QS + 2 itesse tées 5	2 s fois	??	??	J et d'eau, laser Fraisage si n'altère pas éprouvette (méca, t°C)	Vidéo-acquisition ?	

Matrice d'essais établie pour le SMC :

#### 1.2. Construction d'une loi calcul matériau pour Radioss

#### 1.2.1 Loi matériau composite sous Radioss

L'ensemble des modélisations a été réalisé en coques multicouches pour lesquelles nous devons définir le repère du composite dans le repère global en précisant l'empilement et l'orientation des couches (Figure 12).



Figure 12 : coques multicouches sous Radioss

En ce qui concerne la loi matériau, nous avons réalisé une loi élasto-plastique orthotrope avec endommagement, rupture et prise en compte de l'effet vitesse.

Cette loi repose sur un modèle de plasticité basé sur le critère de Tsaï Wu :

Avec:  

$$F(\sigma) = F_{1}\sigma_{1} + F_{2}\sigma_{2} + F_{11}\sigma_{1}^{2} + F_{22}\sigma_{2}^{2} + F_{44}\sigma_{12}^{2} + 2F_{12}\sigma_{1}\sigma_{2} = 1$$

$$F_{1} = -\frac{1}{\sigma_{1y}^{c}} + \frac{1}{\sigma_{1y}^{t}}; \qquad F_{2} = -\frac{1}{\sigma_{2y}^{c}} + \frac{1}{\sigma_{2y}^{t}}$$

$$F_{11} = \frac{1}{\sigma_{1y}^{c}\sigma_{1y}^{t}}; \qquad F_{22} = \frac{1}{\sigma_{2y}^{c}\sigma_{2y}^{t}}$$

$$F_{44} = \frac{1}{\sigma_{12y}^{c}\sigma_{12y}^{t}}; \qquad F_{12} = -\frac{\alpha}{2}\sqrt{F_{11}F_{22}}$$

Les Fij dépendent des limites élastiques en traction (t), compression (c) dans les directions d'orthotropie.

Les contraintes sont fonction du travail plastique pour chaque direction d'orthotropie et il est possible de rendre compte de la rigidification liée à l'effet vitesse :

$$\sigma_{1y}^{t} = \sigma_{10}^{t} (1 + b_{1}^{t} (W_{p}^{1t})^{n1t}) (1 + c_{1}^{t} \ln(\frac{\varepsilon}{\epsilon}))$$
Redices of rescience days to reperive

La loi composite Radioss est renseignée dans le repèréod'orthotropie du matériau composite et on vient définir dans les propriétés la disposition de la matière dans les différentes parties du système considéré. Ainsi les contraintes et déformations dans les repères d'orthotropie (1,2) et global (x,y) suivent les relations suivantes :

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_{1} \\ \varepsilon_{2} \\ \varepsilon_{6} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c^{2} & s^{2} & cs \\ s^{2} & c^{2} & -cs \\ -2cs & 2cs & c^{2} - s^{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ 2\varepsilon_{xy} \end{pmatrix} \text{ et } \begin{pmatrix} \sigma_{1} \\ \sigma_{2} \\ \sigma_{6} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c^{2} & s^{2} & 2cs \\ s^{2} & c^{2} & -2cs \\ -cs & cs & c^{2} - s^{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix}$$

 $c = \cos \theta$ ,  $s = \sin \theta$ 

Ce modèle donne également la possibilité de définir un écrouissage et un endommagement différents en traction et compression et d'utiliser une modélisation de l'endommagement avec contrainte résiduelle permettant de simuler plus fidèlement le comportement d'un SMC jusqu'à la rupture (figure 13).



#### 1.2.2 <u>Détermination des paramètres de la loi composite Radioss</u>

Pour la construction de la loi nous avons utilisé l'ensemble des résultats d'essais sur éprouvettes ; certains paramètres étant identifiés de façon directe et d'autres étant établis par méthode inverse (simulation des éprouvettes).

C'est ce qui est décrit dans la suite du document.

#### Obtention des modules

A partir des essais de traction quasi-statique, des modules d'élasticité ont été déterminés et une moyenne a été calculée pour chaque direction comme on peut le visualiser sur le tableau 1 :

Orientation	N° éprouvette	Module en MPa		
	1	7705		
	2	8361		
<b>0</b> °	3	7317		
	4	8319		
	5	7369		
Moy	yenne	$7814\pm7\%$		
	1	7390		
	2	6999		
<b>45</b> °	3	6949		
	4	8368		
	5	7786		
Moy	yenne	7498 ± 11%		
	1	6013		
	2	6951		
<b>90</b> °	3	6790		
	4	6942		
	5	5989		
Moy	6537 ± 8%			

#### Tableau 1 : Récapitulatif des valeurs des modules d'Young obtenues

Un module d'élasticité isotrope a été calculé en faisant une moyenne pondérée des modules établis dans chaque direction :

$$E(iso) = \frac{E(0^{\circ}) + 2E(45^{\circ}) + E(90^{\circ})}{4} \qquad E(iso) = 7300 MPa$$

#### Obtention des paramètres d'écrouissage

Comme on l'a évoqué dans la présentation du modèle de calcul, l'évolution de la contrainte se fait selon la loi suivante :

$$\sigma_{1y}^{t} = \sigma_{10}^{t} (1 + b_{1}^{t} (W_{p}^{1t})^{n1t}) (1 + c_{1}^{t} \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{0}}))$$

Le travail plastique est calculé en prenant l'intégrale de la courbe contrainte/déformation et en enlevant la partie élastique :

$$W_{p} = \int_{0}^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon - W_{e} = \int_{0}^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon - \frac{\sigma^{2}(\varepsilon)}{2E}$$

On construit ensuite la courbe d'évolution de la contrainte en fonction du travail plastique (figure 14) :



Figure 14 : évolution de la contrainte en fonction du travail plastique

Ces courbes permettent d'identifier les paramètres d'écrouissage b et n

#### Obtention des modules de cisaillement

Le module de cisaillement G<sub>12</sub> dans le plan transverse à été calculé grâce à la formule :

$$G_{12} = \frac{E}{2(1+v_{12})} = 2700 \ MPa$$

Les valeurs de  $G_{13}$  et  $G_{23}$  sont considérées égales et sont déterminées par méthode inverse à partir des essais de flexion restitués dans le rapport de l'année 1.

On simule l'essai de flexion (figure 15) et on itère sur les paramètres  $G_{13}$  et  $G_{23}$  jusqu'à obtenir une bonne corrélation de la montée en charge (figure 16)



Figure 15 : simulation de l'essai de flexion



Figure 16 : courbe effort-course de l'essai de flexion 3 points

#### 1.2.3 <u>Modélisation calcul des essais sur éprouvettes</u>

Nous avons ensuite évalué la pertinence des premiers paramètres déterminés en simulant les essais sur éprouvettes.

Les éprouvettes utilisées pour les essais ont une épaisseur moyenne de 2 mm. Des talons ont été collés aux extrémités des éprouvettes de traction pour qu'elles ne soient pas endommagées à cause du serrage dans les mors comme schématisé sur la figure 17 suivante :



Figure 17 : mise en place de talons

Modélisation de l'essai de traction

Des premiers calculs ont été réalisés en modélisant les talons, mais leur présence entraînant des différences de résultat négligeables, ils ont finalement été supprimés (figure 18).



Figure 18 : Modélisation des éprouvettes de traction

Au niveau des conditions aux limites, une extrémité de l'éprouvette a été encastrée et l'autre appartient à un corps rigide sur lequel on applique un déplacement imposé. On extrait des simulations le déplacement du nœud maître du corps rigide et les efforts traversant une section de l'éprouvette pour la comparaison essai-calcul. Ainsi nous pouvons construire la courbe calcul et la comparer à celle de l'essai (figure 19):



Figure 19 : Corrélation de l'essai de traction quasi-statique sans modélisation de la rupture

Nous observons un bon niveau de corrélation des parties élastique et plastique en traction.

#### Modélisation de l'essai de flexion

Pour la modélisation de cet essai, nous avons représenté les parties en contact avec l'éprouvette (figure 20) et mis en place des interfaces de contact avec frottement.



Figure 20 : modélisation de l'essai de flexion quasi-statique

Les appuis inférieurs sont encastrés et le cylindre supérieur a un déplacement imposé vertical.

On extrait des simulations l'effort traversant le corps rigide du cylindre supérieur et son déplacement pour la comparaison essai-calcul (figure 21) :



Figure21 : Corrélation de l'essai de flexion quasi-statique (élasticité + début de plasticité)

Nous obtenons une bonne corrélation pour la montée en charge.

# 1.2.4 Description numérique de la compression et du cisaillement

Nous nous sommes assez vite aperçus qu'il était impossible de caler correctement un essai de flexion et ce, dès le domaine plastique, si on ne mettait pas en place une modélisation spécifique de la compression, différente de celle de traction.

Nous avons dans un premier temps cherché à identifier la compression par méthode inverse à partir de l'essai de flexion (une fois la traction calée).

Les éléments qui ressortent de cette étude sont que :

- Le comportement en compression diffère totalement du comportement en traction ou en cisaillement
- La tenue en compression du SMC peut être jusqu'à deux fois supérieure à celle de la traction

Les écarts importants entre les propriétés de traction et compression ont rendu impérative la réalisation d'essais de compression afin de travailler sur des éléments tangibles et ne pas modifier les paramètres en aveugle sur de grandes plages de valeurs.

Nous avons exploité ces résultats pour l'analyse et la compréhension du matériau basse densité que nous étudions pour ASP. En particulier, les essais de compression nous ont permis de quantifier l'écart de contrainte entre traction et compression.

De même, les premières simulations ont montré qu'il fallait établir une description plus précise du cisaillement ; en particulier le comportement plastique et l'endommagement en cisaillement 12 doivent être pleinement renseigné dans la loi composite Radioss. Des cisaillements réalisés sur l'autre matériau basse densité similaire à celui de notre étude ont été nécessaire pour compléter l'identification. En particulier, les essais de cisaillement nous ont permis de décrire le comportement en plasticité et endommagement de ces matériaux (cela concerne avant tout la matrice donc transposable au matériau de notre étude pour ASP).

Essais de compression et comparaison aux calculs

Utilisation d'un montage Arcan avec éprouvettes adaptées pour faire un essai de compression.

Après avoir déposé un motif aléatoire sur l'éprouvette, celle-ci est fixée sur les deux flasques du montage Arcan. Les flasques sont fixes par rapport aux mors de la machine de traction. Ce montage a été adapté à une machine de traction électromécanique de capacité 250 kN.

Lorsque l'éprouvette est en place, l'essai de compression est lancé en pilotant la vitesse de déplacement de la traverse. Elle est réglée à 2 mm/min (figure 22)



Figure22 : Montage Arcan et rupture en compression

La contrainte conventionnelle  $\sigma$  est calculée en divisant l'effort *F* par la section initiale *S*<sub>0</sub> de l'éprouvette :  $\sigma = \frac{F}{S_0}$ . La contrainte vraie  $\sigma_V$  est définie à chaque instant par le rapport :

 $\sigma_V = \frac{F}{S}$  où *S* décrit la section de l'éprouvette à l'instant *t*.

Les déformations sont exploitées en corrélations d'images sur le mouchetis déposé : mesure des déformations longitudinales et transversales à l'aide d'une rosette numérique. Les déformations relatives et logarithmiques longitudinales et transversales sont relevées.

Les essais réalisés sur le SMC présentent une bonne répétabilité. Le domaine plastique est très peu marqué et semble parfois inexistant pour certains essais. L'allongement à rupture, compris entre 1 et 1,5 %, est comparable à celui observé en traction. En revanche, la contrainte maximale est plus élevée. En effet, elle est ici comprise entre 90 et 120 MPa alors qu'elle ne dépassait jamais 90 MPa en traction (

Tableau 1):

Vitesse de déplacement machine (mm/s)	Vitesse de déformation (s-1)	Module de Young (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte à la rupture (MPa)	Déformation à la rupture
-2.98E-2 ± 2.38E-4	-18,6E-6 ± 3,7E-6	11438 ± 1190	0.295 ± 0.081	-107.0 ± 8.1	-1.21E-2 ± 3.59E-3

Tableau 1 : Résultats des essais de compression

Calage numérique des propriétés en compression :

L'essai Arcan permet numériquement de retrouver le comportement en compression via une méthode inverse où les résultats de la simulation sont comparés aux résultats expérimentaux(figure 23):



Figure23: Modélisation de l'essai de compression

La démarche pour analyser numériquement cet essai est la suivante :

 $\cdot$  On cherche les propriétés en compression qui permettent d'approcher les résultats d'essai en compression sur ARCAN

 $\cdot$  La déformation mesurée par corrélation au centre de l'éprouvette est comparée aux valeurs de déformations dans la simulation au même endroit

 $\cdot$  La contrainte correspond dans les essais et la simulation au rapport entre la force et la section d'éprouvette au centre

La corrélation calcul-essais est plutôt bonne(figure 24):





Essais de cisaillement et comparaison aux calculs

L'objectif des essais présentés dans cette section est de caractériser les matériaux en cisaillement dans le plan des plaques.

Les éprouvettes de cisaillement sont identiques à celles utilisées en compression. Il en va de même pour le montage expérimental. Le montage Arcan est ici utilisé tourné de 90° par rapport aux essais de compression. L'éprouvette est fixée aux deux flasques du montage qui est lui-même adapté à une machine de traction électromécanique de capacité 250 kN (figure 25):



Figure 25 : Montage Arcan et rupture en cisaillement

Les déformations sont exploitées en corrélations d'images sur le mouchetis déposé : mesure des déformations longitudinales et transversales à l'aide d'une rosette numérique. Les déformations relatives et logarithmiques longitudinales et transversales sont relevées. La déformation relative de cisaillement est directement obtenue.

La déformation logarithmique de cisaillement peut être calculée comme suit :  $\varepsilon = \frac{\varepsilon_I - \varepsilon_{II}}{2}$ 

avec  $\varepsilon_I$  la déformation logarithmique longitudinale et  $\varepsilon_I$  la déformation logarithmique transversale (cette dernière est négative).

Les essais réalisés sur le SMC présentent une bonne répétabilité dans le domaine élastique. En revanche, le comportement à rupture n'est pas le même pour tous les essais. La plupart des éprouvettes présente un allongement à la rupture compris entre 1,5 et 2,5 % alors qu'une autre présente un allongement à rupture de l'ordre de 7,5 %. Ce dernier cas est dû au fait que la rupture s'est produite dans la zone de mesure alors que, dans la plupart des cas, la rupture intervient à côté de la zone de cisaillement pur et n'est pas vue par la rosette virtuelle utilisée lors de la mesure. Cet essai est donc considéré comme une singularité.

La contrainte à rupture est proche d'un essai à l'autre. Elle est d'environ 70±3 MPa pour tous les essais (Tableau 2) :

	Vitesse de déplacement machine (mm/s)	Vitesse de déformation (s-1)	Module de cisaillement (MPa)	Contrainte à la rupture (MPa)	Déformation à la rupture
I	2.16E-2 ± 2.86E-4	1.14E-4 ± 2.06E-5	4537 ± 486	70 ± 3	2.43E-2 ± 1.12E-2

Tableau 2 : Résultats des essais de cisaillement

Calage numérique des propriétés en cisaillement :

La démarche pour caler les paramètres de la loi en cisaillement est identique à la compression avec l'utilisation du même maillage de l'essai Arcan mais avec un déplacement imposé dans la direction Y au lieu de la direction X. Les résultats numériques sont comparés aux données expérimentales en considérant que la contrainte de cisaillement correspond bien au rapport entre la force et la section au centre de l'éprouvette.



La corrélation calcul-essais est plutôt bonne (figure 26):

Figure26: Comparaison calcul-essais en cisaillement

#### 1.2.5 Prise en compte de l'effet vitesse

#### Loi composite Radioss et études des essais réalisés

Jusqu'ici les paramètres mis en place ont été calibrés sur des essais en quasi-statique alors que notre loi est destinée à la modélisation de chocs. Il est donc important de prendre en compte l'effet de la vitesse sur les contraintes maximales.

Dans la loi composite Radioss l'effet de la vitesse est introduite grâce à un paramètre c :

$$\sigma_1 = \sigma_{y_0} (1 + b(W_p)^n) (1 + c \ln(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_o}))$$

L'effet de c sur la contrainte maximale est introduit de la manière suivante (figure 27):



Figure 27 : Effet de la vitesse sur la contrainte maximale

Des essais de traction à grandes vitesses ont été réalisés afin de rendre compte de l'évolution de la contrainte maximale avec la vitesse.

Les essais ont été effectués sur de petites éprouvettes (60\*10 mm) prises à 0 et  $90^{\circ}$  dans des plaques de matière fluée (figure 28) :



On peut visualiser sur la figure 29 ci-dessous les courbes contrainte/déformation pour les éprouvettes découpées à  $0^{\circ}$  pour un essai quasi-statique puis des vitesses de déformation entre 33 et 167 s<sup>-1</sup>.

Vitesse de barre (m.s <sup>.1</sup> )	1e-4	1	2	3	5
Vitesse de déformation (s <sup>.1</sup> )	3.33e-3	33	67	100	167



Figure 29 : Essais de traction à différentes vitesses sur des éprouvettes prises à 0° (fig. gauche) et 90° (fig. droite)

#### Détermination de c

Sur ces essais à 0 et 90°, nous avons déterminé le paramètre c par transformation de la relation d'évolution de  $\sigma_{max}$  et par régression linéaire.

avec

 $\dot{\varepsilon}_0 = 0.00333 s^{-1}$ 

qui correspond à la vitesse de déformation de l'essai en quasi-statique.

Sur la figure 30 suivante le point origine correspond à l'essai quasi-statique et les nuages de points correspondent aux essais à plus hautes vitesses.



Figure 30 : Evaluation de l'effet vitesse (coefficient c)

Le calage de la loi calcul composite peut être fait avec comme vitesse de référence celle de l'essai statique ou avec une vitesse de référence plus importante et des coefficients de vitesse adaptés.

#### 1.2.6 Caractérisation de l'endommagement et de la rupture

Cette partie de la caractérisation et de la modélisation a été une des plus délicates car les phénomènes microscopiques de déchaussement des fibres, rupture... etc. doivent être intégrés de façon macroscopique dans la loi composite Radioss.

#### Pilotage de la rupture en calcul sous Radioss

La loi composite Radioss dispose de deux moyens de pilotage de la rupture :

Le premier est un critère de travail plastique maximal. Il peut être géré couche par couche de l'élément et lorsque l'ensemble des couches de l'élément a atteint le travail plastique limite, l'élément est supprimé.

Un deuxième critère de rupture a fait son apparition dans la version 5 de Radioss pour la loi composite Radioss. Il s'agit d'un pilotage de la rupture par déformation limite en traction qu'on définit dans les directions 1 et 2 du repère d'orthotropie du composite (paramètres désignés Ef1 et Ef2 dans la loi matériau).

Ce critère peut également être géré couche par couche avec suppression de l'élément lorsque toutes les couches ont atteint leur valeur limite.

#### Examen des éprouvettes d'essais

La détermination de la façon de modéliser l'endommagement du matériau et la rupture a été orientée par l'examen des éprouvettes endommagées pendant les essais.

#### Essais de traction

En traction nous avons un endommagement progressif du matériau qui commence très tôt comme l'explique la figure 31:



**Figure 31 : Endommagement et rupture en traction** 

Dans le modèle de calcul, l'élasticité, la plasticité et l'endommagement sont décrits successivement alors que l'endommagement physique intervient très tôt comme nous venons de le dire. Nous avons donc calé numériquement les paramètres d'élasto-plasticité permettant de simuler correctement les efforts vus pendant l'essai. L'endommagement et la rupture ont été calés avec les paramètres décrits précédemment de façon à représenter macroscopiquement les pertes de rigidité et ruptures associées aux phénomènes microscopiques de déchaussement des fibres et ruptures vus sur éprouvettes (figure 32):



Figure 32 : Faciès de rupture d'éprouvettes en traction

# Essais de flexion

Lors des essais de flexion, on observe un endommagement des couches inférieures comme nous pouvons le voir sur la figure 33:



Figure 33 : Observation de l'endommagement en flexion

En effet l'endommagement s'initie par une rupture en traction de la partie inférieure avec déchaussement des fibres suivie de la rupture totale (figure 34)



Figure 34 : Déchaussement des fibres + rupture en flexion

Les paramètres d'endommagement en traction ont été calés sur la base de ces résultats toujours par méthode inverse.

#### Essais CMA

Nous faisons le même constat pour les essais de chocs multiaxiaux. En effet l'endommagement et la rupture interviennent du côté opposé à l'impact qui est plus fortement sollicité en traction (figure 35).



Figure 35 : Endommagement et rupture: éprouvette CMA non traversée (centre) et traversée (droite) en vue de dessous

#### Essais sur corps creux

Des résultats d'essais d'impact sur des morceaux de doublure de capot composite prototype ont été utilisés afin de corréler en calcul le comportement d'un sous-système envisagé pour la protection de la tête des piétons (figure 36). Cet essai vise à reproduire le contact entre la doublure de capot composite et un point dur de la structure du véhicule.



Figure 3 : Corps creux de doublure de capot

Les essais avaient été réalisés sur la machine piéton Plastic Omnium : le bras positionné horizontalement, le vérin lanceur propulse un chariot équipé d'un impacteur rigide sur l'éprouvette bridée sur son support (figure 37).



Figure37 : Machine d'essai piéton et impact sur corps creux

On mesure l'effort et l'enfoncement en fonction du temps ; l'impact et la déformation de l'échantillon sont également filmés à l'aide d'une caméra rapide 1000 images/sec.

Nous avons effectué des tirs avec un impacteur de 7,9kg à plusieurs vitesses (entre 4 et 6,5 m/s).

Nous retrouvons encore une fois une rupture des parties fortement sollicitées en traction comme on peut le voir sur le corps creux impacté figure 38.



Figure38 : Visualisation de la zone endommagée du corps creux sur le côté opposé à l'impact

D'autres fissures apparaissent sur le corps creux et semblent s'apparenter à des craquelures de surface de la matrice. On peut considérer que ce phénomène est analogue à celui observé lors des essais de traction. En effet, nous avons vu que des endommagements visibles intervenaient très rapidement.

D'autres parties du corps creux présentent d'autres formes de détérioration que l'on peut attribuer à de la rupture par cisaillement inter-laminaire comme le montre la figure suivante 39:



Figure 39 : Visualisation de zones endommagées par cisaillement inter-laminaire

Ces essais ont montré qu'il fallait aussi prendre en compte en calcul la perte de rigidité liée au cisaillement inter-laminaire, c'est pourquoi nous avons aussi mené des essais de flexion 3points avec appuis rapprochés pour caractériser ce mode de rupture. Tous ces essais ont servi pour le calage de la loi calcul du SMC basse densité (voir chapitres suivants).

## 1.2.7 <u>Méthode de détermination des paramètres d'endommagement et de rupture</u> <u>de la loi composite Radioss</u>

C'est à partir de toutes ces observations sur éprouvettes que nous avons pu déterminer les paramètres à utiliser pour modéliser le comportement du matériau. Trois points ressortent de ce qui a été observé précédemment :

- Il est clair que l'on ne peut pas introduire des paramètres identiques en traction et compression.
- On utilisera un pilotage de la rupture par déformation limite.

• Les paramètres d'endommagement et de contrainte résiduelles  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  et  $\sigma_{res}$  serviront à simuler la perte de raideur due au déchaussement des fibres. Ces paramètres permettent d'obtenir le comportement décrit ci-dessous.

Chaque portion de la courbe correspond à une observation faite sur le comportement des éprouvettes(figure 40):



Figure 40 : Correspondances entre la loi numérique et les observations faites sur le matériau

#### Détermination des paramètres d'endommagement

Comme nous l'avons déjà évoqué, le déchaussement des fibres suivi de la rupture totale intervient en fin de courbe de traction. C'est pour cela que le premier paramètre d'endommagement  $\varepsilon_1$  a été calibré pour intervenir à ce moment-là.

Ce paramètre a alors été réinjecté pour l'essai de flexion 3 points. Le pic de charge n'est pas assez élevé et l'endommagement intervient trop rapidement comme le montre la figure 41. La contrainte maximale en compression a donc été ajustée afin de corréler le pic de charge.



Figure 41 : Corrélation de l'essai de flexion 3 points

Un travail en parallèle sur les essais de flexion et CMA a été mené afin de régler les paramètres  $\varepsilon_2$  et  $\sigma_{res}$  en particulier pour représenter la pente de la chute de raideur lors du déchaussement des fibres en flexion 3 points et le pic de charge relevé pendant l'essai CMA (figure 42).



Figure 42 : Travail en parallèle sur l'essai de flexion (à gauche) et l'essai CMA (à droite)

On itère sur les deux essais jusqu'à atteindre un jeu de paramètres corrélant les deux essais.

#### Détermination des paramètres de rupture

La rupture par déformation limite a été réglée sur l'essai CMA (figure 43) afin d'obtenir la bonne chute de raideur après le pic de charge.



Figure 43 : Obtention des paramètres de déformation limite avec l'essai CMA

Prise en compte du cisaillement inter-laminaire

Des essais de flexion 3 points avec appuis rapprochés (figure 44) ont été réalisés selon l'ISO 14130 destiné aux composites plastiques renforcés par des fibres. L'objectif est de déterminer la résistance au cisaillement inter-laminaire responsable dans un grand nombre de cas de la rupture des pièces.

Cela consiste en des essais de flexion 3 points avec des appuis rapprochés (ici 16mm) Vitesse : 1mm/min



Figure 44: Essai de flexion 3 points avec appuis rapprochés

Le mode de rupture (figure 45) est caractéristique du cisaillement inter-laminaire. L'observation des éprouvettes pendant les essais de flexion trois points avec appuis rapprochés a permis d'en comprendre le fonctionnement. Les essais sont un peu dispersés mais la rupture intervient toujours de manière brutale sur l'éprouvette entraînant une chute d'effort rapide.



Figure 45 : Rupture par cisaillement inter-laminaire sur un essai de flexion 3 points avec appuis rapprochés

Au niveau de la loi composite Radioss on définit des paramètres d'adoucissement  $\varepsilon_1$  et  $\varepsilon_2$  très proches afin d'obtenir la chute brutale d'effort et une contrainte résiduelle  $\sigma_{res}$  proche de 0. Nota : la reprise d'effort constatée en essai après rupture correspond au contact de l'éprouvette sur les parois verticales des appuis du fait de leur position rapprochée (figure 46).



Figure 4 : Simulation de l'essai de flexion 3 points avec appuis rapprochés

La simulation permet de rendre compte de la chute d'effort liée à la rupture par cisaillement inter-laminaire.

#### Influence du maillage

L'influence du maillage a été testée sur l'essai de flexion. On constate que le maillage a une influence non négligeable sur l'endommagement et la rupture : les paramètres  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ , et  $\varepsilon_f$  sont dépendants de la taille de maille.

La loi Radioss du SMC basse densité a été mise en place pour une taille de maille de 2.5 mm.

# 1.2.8 Corrélations calcul-essais sur éprouvettes

Ce chapitre présente la corrélation calcul-essais sur éprouvettes suite au calage de la loi Radioss du SMC basse densité précédemment décrit.

#### Essais de traction

On obtient une corrélation satisfaisante (figure 47) avec une rupture de l'éprouvette numérique comparable à celle des éprouvettes d'essais.



Figure 5 : Corrélation de l'essai de traction

#### Essais de flexion 3 points

Le calcul reprend bien la chute d'effort due au déchaussement des fibres. On observe la rupture des couches inférieures que l'on retrouve dans le listing de la simulation (figure 48)



Figure 48 : Corrélation de l'essai de flexion trois points

#### Essais de traction grande vitesse

Une comparaison essai-calcul a été faite pour des éprouvettes non fluées en traction à la vitesse de déformation de 10s-1. On constate que le pic de charge est bien représenté en simulation mais pour des déformations plus importantes qu'en essai (figure 49).



Figure 49: Corrélation de l'essai de traction dynamique à 10 s<sup>-1</sup>

## Essai de choc multiaxial (CMA)

Les éprouvettes utilisées pour cet essai sont de dimensions 100\*100\*2,0 mm.



Nœuds bloqués suivant la verticale

Noeuds encastrés

L'impacteur est modélisé par une demi-sphère contenue dans un corps rigide sur lequel on vient définir une masse 12850 g et une vitesse initiale. Les essais ont été effectués à trois vitesses d'impact : 1.03, 1.77 et 2.43 m/s.

On obtient les comparaisons essai-calcul suivantes (figure 50):



Figure 50 : Essai CMA à 1.03 m/s

La corrélation de la courbe effort/déflexion est, elle aussi, satisfaisante et on retrouve bien en simulation une rupture locale sans que la plaque soit transpercée, comme le montre la figure 51:







Il en est de même pour les deux autres vitesses d'impact où l'on vient transpercer la plaque.

Figure 52 : Corrélation des essai CMA à 1.77 m/s (à gauche) et 2.43 m/s (à droite)

Nous observons un deuxième pic de charge sur la simulation (figure 52). Ce pic est de nature numérique et s'explique par le fait qu'on a un maillage fin mais impliquant peu d'éléments à l'échelle d'une éprouvette. Ce phénomène tend à disparaître pour des maillages plus fins et pour de plus gros systèmes.

Le faciès de rupture de la simulation de la figure53 suivante est lui aussi satisfaisant :



Figure 6 : Comparaison du faciès de rupture entre la simulation et l'essai CMA à 2.43 m/s

#### Essai sur corps creux

Les corps creux provenant des doublures de capots ont une épaisseur de 2,5 mm. Pendant l'essai les corps creux sont fixés grâce à des brides. Ce bridage provoque une déformation des corps creux qu'il est difficile de simuler par des conditions aux limites. C'est pourquoi nous avons décidé de modéliser le bridage en modélisant avec du contact le bâti rigide et les quatre brides qui viennent appliquer un effort progressif par l'intermédiaire de ressorts comme nous pouvons le voir sur la figure 54.



Figure 54: Modélisation du bridage

Une fois le bridage réalisé, nous récupérons le maillage déformé et on vient encastrer les nœuds de la zone de bridage(figure 55) ).



Figure 7 : Mise en place des conditions aux limites

Par ce procédé, nous ne récupérons pas les contraintes localement générées par le bridage, mais comme il ne s'agit pas de la zone que l'on souhaite observer, nous nous autorisons cette approximation.

L'impacteur modélisé par des volumes inclus dans des corps rigides est guidé suivant la verticale. Il a une masse de 7 919 g et nous lui appliquons une vitesse initiale de 6.5 m/s. Pour la modélisation des contacts, un coefficient de friction de 0.3 a été introduit.

Qualitativement, les zones déformées et chargées sont bien représentées (figure 56):



Figure 56 : Comparaison visuelle de la déformée entre l'essai et la simulation

Nous retrouvons la rupture des couches opposées à la zone d'impact sur une ligne d'élément, ce qui simule bien ce qui est observé sur les éprouvettes d'essais (figure 57):


#### Figure 57 : Reproduction des zones cassées en calcul

La corrélation au niveau de la décélération du poinçon (figure 58) est bonne : la pente et le pic sont bien représentés. La décharge est un peu lente en simulation pour l'impact sur corps creux.



Figure 58 : décélération du poinçon impacteur

L'examen des déformations dans les couches externes du corps creux permet de visualiser en calcul les zones où l'endommagement en cisaillement inter-laminaire a été activé (figure 59). Elles correspondant bien à celles observées en essai.



Figure 59: Visualisation des zones de rupture par cisaillement inter-laminaire

#### Conclusion sur les corrélations

La méthode de détermination des paramètres mise en place grâce à l'observation des éprouvettes endommagées a permis de développer une loi unique qui permet d'obtenir des corrélations satisfaisantes des différents essais (traction, flexion, CMA), ainsi que sur un essai de semi-synthèse comme l'impact sur les corps creux.

#### 1.2.9 Corrélation calcul-essais sur pièce automobile en choc tête

La loi matériau obtenue a finalement été utilisée pour le calcul d'un choc tête sur capot à doublure composite afin de permettre de juger de la corrélation par rapport aux essais (les essais avaient été réalisés avec RSA sur un capot hybride composite prototype).

La simulation est celle du choc tête enfant Réglementaire 3,5kg lancée à 35km/h à 50° par rapport à l'horizontale(figure 60):



Figure 60 : Simulation du choc tête sur capot à doublure composite

La simulation reproduit bien le profil de décélération tête : pente, pic et  $2^{\text{ème}}$  partie de choc avec endommagement micro (figure 61). Le HIC et l'enfoncement sont bien reproduits (avec des erreurs respectives de 10% et 2%).



Figure 61 : Comparaison essai-calcul de la décélération [g] tête enfant 3,5kg en fonction du temps [ms]

# 1.3. Caractérisation du SMC à renfort continu

L'objet de ce chapitre a été de caractériser et créer une loi calcul d'un 2ème matériau SMC mais à renfort continu (fibres de verre unidirectionnelles - UD) pour les zones très contraintes des véhicules.

Ce rapport fait le compte rendu des résultats expérimentaux obtenus en quasi-statique pour le SMC UD verre, comprenant des résultats d'essais de traction, de compression, de flexion, de cisaillement dans le plan et de cisaillement dans l'épaisseur (flexion avec appuis rapprochés). Des résultats en traction à différentes vitesses de sollicitation, s'échelonnant de  $5^{e}$ -4 s<sup>-1</sup> à 50 s<sup>-1</sup> sont ensuite analysés. Les résultats de simulation numérique sont aussi présentés.

# 1.3.1 Caractérisation du SMC UD VERRE

Le matériau étudié est un matériau composite de type SMC (Sheet Molding Composite). Le principe d'obtention d'une pièce en SMC est la compression à chaud d'un pré-imprégné placé dans un moule. Le matériau étudié est composé à 50 % de fibres de verre continues. Le matériau est dit « unidirectionnel » à cause du grand nombre de fibres orientées dans la même direction.

Nombre d'essais								
Matériaux			SMC UD VERRE					
Sens de prélèver	nent		0° 45° 90°					
Essais de traction par vitesses d'essais	Machine électromécanique	$5E^{-4} s^{-1}$	5	5	5			
	Machine hydraulique	$5E^{-2} s^{-1}$	5		5			
		5E <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>	5		5			
		2 s <sup>-1</sup>	5	5	5			
	Machine dynamique	50 s <sup>-1</sup>	5		5			
Flexion			5	3	5			
Cisaillement			5	3	5			
Compression			5	3	5			
Flexion appuis r	approchés		5 3 5					

La matrice des essais menés sur le SMC UD VERRE est représentée tableau 4 :

Tableau 4 : Essais réalisés sur le SMC UD VERRE

#### Résultats en quasi statique

Cette section présente les résultats obtenus en quasi-statique, que ce soit en traction, en compression, en cisaillement, en flexion et en flexion avec appuis rapprochés.

#### Traction à $5^{e}$ -4 s<sup>-1</sup> (base ISO 527)

Pour rappel, les essais de traction en quasi statique sont menés sur des éprouvettes rectangulaires dont la longueur utile est de 60 mm, la largeur est de 25 mm et l'épaisseur est de 3mm. La figure 62 schématise les conditions aux limites lors des essais de traction en quasi-statique.



Figure 62 : Conditions aux limites des essais de traction en quasi-statique

#### Courbes de traction

La figure 63 donne les courbes de traction obtenues pour les essais réalisés sur des éprouvettes prélevées à 0°, c'est-à-dire dans la direction des fibres. Le comportement du matériau est linéaire jusqu'à l'effort maximal. Puis la rupture de l'éprouvette intervient rapidement, pour une déformation légèrement supérieure à 2 %. La contrainte maximale atteinte est de l'ordre de 450 MPa. Les 5 courbes à 0° sont proches les unes des autres, ce qui montrent une bonne reproductibilité des essais.

Comportements mécaniques observés à  $45^\circ$  et  $90^\circ$  : les courbes sont tracées respectivement en figure 64 et figure 65



Figure 63 : Courbes de traction à 0° pour une vitesse de 5<sup>E</sup>-4 s<sup>-1</sup>



Figure 64 : Courbes de traction à 45° pour une vitesse de 5<sup>E</sup>-4 s<sup>-1</sup>



Figure 65 : Courbes de traction à 90° pour une vitesse de 5E-4 s<sup>-1</sup>

La figure 66 trace sur un même graphique toutes les courbes de traction pour mettre en évidence la différence de comportement d'une direction à l'autre.



Figure 66: Comparaison des courbes de traction à 0° (bleu), 45° (rose) et 90° (vert)

Les essais ont été filmés en caméra rapide et analysés par corrélation d'images afin de remonter au champ de déformations. Comme le montrent pour un essai à 90° la figure 67(a) et pour un essai à 45° figure 67 (b), les déformations sont localisées suivant des lignes parallèles aux fibres. De telles lignes ne sont pas visibles à 0° comme l'illustre la figure 67 (c).



#### Figure 67 : Champ de déformation principale majeure de Hencky à (a) 90° (b) 45° et (c) 0° obtenus avant la rupture complète de l'éprouvette

#### Compression

Pour rappel, les essais de compression sont menés sur des éprouvettes de type Arcan afin de limiter son flambage. Pour solliciter en compression, le montage Arcan est positionné à 90°. La largeur de la zone utile de l'éprouvette est de 25 mm et l'épaisseur de 3mm. Cet essai ne donne pas directement des données propres à la compression car le chargement n'est pas uniaxial à cause de la forme particulière de l'éprouvette. Une modélisation par méthode inverse est indispensable pour ce type d'essai afin de retrouver numériquement les caractéristiques en compression. La figure 68 montre les conditions aux limites mis en œuvre lors des essais de compression. Cette figure précise que des inserts métalliques sont mis en place. Ils permettent d'éviter la rupture des éprouvettes à 0° par cisaillement de la matrice au niveau des trous de passage de vis.



Figure 68: Conditions aux limites des essais de compression en quasi-statique

#### Courbes de compression

La figure 69 compare les courbes de compression obtenues pour les trois directions testées :



Figure69 : Comparaison des courbes de compression à 0° (bleu), 45° (rouge) et 90° (vert)

Comme en traction, les résultats montrent que le comportement en compression est anisotrope toutefois l'anisotropie est moins prononcée et le comportement est similaire d'une direction à l'autre, ainsi que le mode de rupture. Le champ de déformation est semblable d'une direction à l'autre. Un exemple est donné figure 70. La direction 0° présente les meilleures propriétés, vient ensuite la direction 45° puis la direction 90° qui présente les propriétés les plus basses.



Figure 70: Champ de déformation principale mineure de Hencky à 45°

### **Cisaillement**

Pour rappel, les essais de cisaillement sont menés sur des éprouvettes de type Arcan. Pour être sollicitée en cisaillement, la zone utile de l'éprouvette est placée verticalement. La hauteur de la zone utile de l'éprouvette est de 25 mm et l'épaisseur de 3mm. De par la géométrie de l'éprouvette et du montage Arcan, cet essai conduit à du cisaillement pur. La figure 71montre les conditions aux limites mises en œuvre lors des essais de cisaillement.



Figure71 : Conditions aux limites des essais de cisaillement en quasi-statique

### Courbes de cisaillement

La figure 72 représente les courbes contraintes - déformations obtenues pour les essais de cisaillement à  $0^{\circ}$  (les fibres sont parallèles au sens de sollicitation).

Le même type de comportement est observé à  $90^{\circ}$ , dont les courbes de cisaillement sont tracées figure 76. La figure 75 comparant les courbes de cisaillement obtenues dans les différentes directions de sollicitation.

Comme le montre la figure 73, deux comportements distincts sont mis en évidence à 45°. Ces deux types de comportement sont liés à deux positions différentes de l'éprouvette dans les mors du montage Arcan, schématisées figure 76.



Figure72 : Courbes de cisaillement à 0°







Figure74 : Courbes de cisaillement à 90°



Figure 75 : Comparaison des courbes de cisaillement à 0° (bleu), 45° (rouge) et 90° (vert)



Figure76 : Direction des fibres de l'éprouvette de cisaillement à 45° placée suivant deux postions différentes

Comme pour les autres sollicitations réalisées, une forte anisotropie est observable en cisaillement. A 0°, la sollicitation étant parallèle aux fibres, l'essai revient à cisailler la matrice. C'est pourquoi les caractéristiques à rupture sont les moins bonnes dans cette direction. En comparaison, les fibres sont cisaillées pour les essais à 90°, ce qui aboutit à des caractéristiques plus élevées. La figure 77 montre les champs de déformation en cisaillement obtenus à 0° puis 90°. Les images montrent que les déformations se localisent dans des zones parallèles aux fibres.





**(b)** 

Figure 77 : Champ de déformation principale de cisaillement à (a)  $0^\circ$  et à (b)  $90^\circ$ 

# Flexion appuis rapprochés (cisaillement dans l'épaisseur - Base ISO 14130)

L'objectif des essais de flexion avec appuis rapprochés est de caractériser le cisaillement interlaminaire du matériau. Ce cisaillement est réalisé grâce à un essai de flexion 3 points avec les appuis très rapprochés pour que les contraintes de cisaillement deviennent prépondérantes par rapport aux contraintes de flexion. Le schéma de la figure 78 illustre les dimensions du montage utilisé et en donne ainsi les conditions aux limites. Pour ces essais, les éprouvettes utilisées mesurent 30 mm de longueur pour 25 mm de largeur et 3mm d'épaisseur.



Figure 78: Conditions aux limites des essais de flexion avec appuis rapprochés (cisaillement interlaminaire)

### Courbes de flexion appuis rapprochés

Le comportement du matériau en flexion avec appuis rapprochés est représenté par des courbes traçant l'évolution de l'effort en fonction du déplacement. Ces courbes sont tracées pour les trois directions de sollicitation en figure 79figure.



Figure 79 : Comparaison des courbes de flexion appuis rapprochés à 0° (bleu), 45° (rouge) et 90° (vert)

Comme pour les autres sollicitations, les essais de cisaillement interlaminaire (ou flexion avec appuis rapprochés) présentent une anisotropie. A 90°, l'essai revient à cisailler la matrice dans son épaisseur, ce qui explique pourquoi la contrainte maximale est la plus faible. En effet, aucune fibre ne rigidifie la structure dans cette direction.

Lors des essais de flexion avec appuis rapprochés, des images de la tranche de l'éprouvette sont acquises pour pouvoir mesurer les déformations en cisaillement interlaminaire. Le champ de déformation obtenu sur un essai à 0° est illustré figure 80.



Figure 80: Champ de déformation principale de cisaillement en flexion appuisrapprochés

### Flexion 3 points (base ISO 178 - ISO 14125)

Les essais sur éprouvettes précédents ont servi à définir les caractéristiques principales du matériau et ont été modélisés en calcul pour reproduire le comportement de chaque essai. L'essai de flexion 3 points est utilisé comme cas test pour valider la loi de comportement obtenue à partir des autres sollicitations car il présente des comportements différents dans les couches donc plus complexe à corréler. Le schéma de la figure 81illustre les dimensions du montage utilisé et en donne ainsi les conditions aux limites. Pour ces essais, les éprouvettes utilisées mesurent 120 mm de longueur pour 25 mm de largeur et 3mm d'épaisseur.



Figure 81 : Conditions aux limites des essais de flexion 3 points

### Courbes de flexion

La figure 82 représente les courbes effort-déplacement obtenues pour les essais de flexion à  $0^{\circ}$ .



Figure82 : Courbes de flexion 3 points à 0°

Les comportements observés à 45° et à 90° sont très différents du comportement à 0°. Comme le montrent la figure 83 ainsi que la figure 84 pour ces deux directions, un court domaine linéaire est observable en début de courbe. Il est suivi d'une chute d'effort caractéristique d'une première rupture de la matrice de l'éprouvette. Les fibres de l'éprouvette n'étant pas rompues, l'effort augmente de nouveau jusqu'à ce que la matrice se casse en un autre point. Les ruptures apparaissent le long des fibres contenues dans le matériau. Ce comportement se répète plusieurs fois jusqu'à rupture complète de l'éprouvette.



Figure83 : Courbes de flexion 3 points à 45°



Figure 84 : Courbes de flexion 3 points à 90°



La figure 85 compare les courbes de comportement pour les trois directions testées.

Figure 85 : Comparaison des courbes de flexion 3 points à 0° (bleu), 45° (rouge) et 90° (vert)

#### Résultats en vitesse

Cette section présente les résultats obtenus en traction pour d'autres vitesses de déformation. L'objectif de ces essais est de rendre compte de l'influence de la vitesse sur les propriétés du matériau. Les vitesses testées sont :  $5^{e}$ -4,  $5^{e}$ -2,  $5^{e}$ -1, 2 et 50 s<sup>-1</sup> (les résultats obtenus à  $5^{e}$ -4 s<sup>-1</sup> ont été détaillés au paragraphe 0).

Ces essais sont menés sur différentes machines, suivant la vitesse souhaitée. Les essais à  $5^{e}$ -4 s<sup>-1</sup> effectués sur une machine de traction électromécanique. Les essais à  $5^{e}$ -2,  $5^{e}$ -1 et 2 s<sup>-1</sup> sont réalisés sur une machine de traction hydraulique. Les éprouvettes sont les mêmes que pour la traction quasi statique sauf pour les essais à 50 s<sup>-1</sup> qui sont effectués sur une machine de traction dynamique de 20kN de charge seulement (les éprouvettes de traction 0° à 50 s<sup>-1</sup> sont par conséquent réduites à 15mm de large et 30mm de longueur utile avec une épaisseur de 1,5mm au lieu de 3mm de façon à réduire l'effort maxi).

Toutes les machines sont équipées de mors auto-serrant. Ainsi, les conditions aux limites de chaque essai de traction sont similaires, quelle que soit la vitesse de déformation.

Synthèse des résultats

Courbes de traction

La figure 86 trace sur un même graphique les courbes obtenues à  $0^{\circ}$  pour plusieurs vitesses de traction et la figure 87 pour les essais à  $90^{\circ}$ . Pour ces deux graphiques, seuls les essais médians sont tracés car la disparité des essais est faible et identique pour toutes les vitesses testées.

<sup>e</sup>-2, 5<sup>e</sup>-1, 2 et 50 s<sup>-1</sup>. Les vitesses réellement obtenues sont indiquées dans les légendes de la figure 86 et figure 87.

Les graphiques comparant les courbes obtenues aux différentes vitesses testées, montrent que le comportement mécanique du matériau varie faiblement jusqu'à 1 s<sup>-1</sup>. Les comportements à  $0^{\circ}$  comme à 90° n'évoluent quasiment pas sur cette plage de vitesses de déformations et même jusqu'à 17 s-1 à 0°.

Seuls les essais réalisés à 50 s<sup>-1</sup> montrent une différence mais nous avons eu des difficultés lors des essais qui ont remis en cause ces résultats







Figure 87: Comparaison des essais de traction à 90° pour différentes vitesses de sollicitation

Spécificités des essais de traction à 50 s-1

Les essais réalisés à la vitesse de 50 s<sup>-1</sup> présentent plusieurs spécificités qui peuvent justifier en partie le manque de précision des mesures et le manque de cohérence des résultats.

Tout d'abord, les éprouvettes utilisées pour les essais à  $0^{\circ}$  à  $50 \text{ s}^{-1}$  sont d'épaisseur 1,5mm seulement. Cela permet de réduire l'effort à rupture des éprouvettes afin de ne pas dépasser la capacité de la machine de traction dynamique. Des essais réalisés sur la machine hydraulique avaient par ailleurs permis de mettre en évidence que le comportement du matériau à épaisseur 1,5mm était très proche du comportement du matériau à épaisseur 3mm c'est pourquoi nous avions validé cette réduction d'épaisseur pour mener les essais à plus haute vitesse mais ces derniers se sont avérés très dispersés.

Aussi, la longueur utile des éprouvettes ainsi que leur largeur sont plus faibles dans le cas des essais à 0°. Cela permet d'une part d'augmenter la vitesse de déformation et d'autre part de réduire l'effort à rupture. En revanche, la diminution des dimensions entrainent des écarts types plus élevés.

Par ailleurs, nous avons eu des difficultés notamment au niveau de la consigne de vitesse et de l'exploitation des résultats : la corrélation d'images sur la surface de l'éprouvette a été difficile notamment pour suivre les pattern (du motif aléatoire peint) en déplacement et en déformation et nous avons constaté des différences de comportement entre la couche de surface et les autres qui peuvent expliquer en partie ces résultats.

Le dernier point pouvant engendrer des imprécisions de mesures est l'inertie des mors lors des essais de traction. En effet, la vitesse de déplacement étant très élevée et la masse des mors étant relativement importante, leur inertie peut induire des efforts sur le capteur non négligeables face aux efforts mis en jeu par la traction elle-même. Ces efforts ne sont pas pris en compte lors de l'exploitation des essais et peuvent expliquer en partie pourquoi les contraintes maximales mesurées à 50 s<sup>-1</sup> sont élevées comparativement aux résultats des autres vitesses.

Les courbes de traction à 50 s<sup>-1</sup> sont très dispersées comme le montre la figure 88 pour les essais à 90° et la figure 89 pour les essais à 0° et ont été remises en question.

Des essais de choc multi axial (CMA) à plusieurs vitesses ont été réalisés et utilisés pour la corrélation calcul ; ils ont permis de valider le modèle mathématique développé.



Figure 88 : Essais de traction à 90° à la vitesse de 50 s<sup>-1</sup>



Figure 89 : Essais de traction à 0° à la vitesse de 50 s<sup>-1</sup>

# 1.3.2 Simulation du SMC UD VERRE

Le travail a consisté au calage de la loi numérique en simulant chacun des essais sur éprouvette (méthode inverse). Nous avons maillé les éprouvettes (rectangulaires pour caractériser ce matériau UD) et mis en place les modèles de calcul.

Le calage de la loi s'est avéré difficile du fait de la forte orthotropie de ce matériau.

- Le calage du modèle a été effectué de la manière suivante :
- Paramètres en traction
- Paramètres en compression
- Paramètres en cisaillement
- Vérification de la flexion (essai de semi-synthèse)
- Vérification de la flexion avec appuis rapprochée
- Ajout d'essais de chocs multi axiaux plus complexes à corréler

Les nombreuses itérations faites ne sont pas décrites dans ce rapport ; le calage final est présenté et atteste de la validité de la loi numérique. La loi créée est une loi 25 Radioss (loi élasto plastique avec endommagement et prise en compte de l'effet vitesse. Différenciation traction/compression. Description de la rupture. Les éléments de taille 3 à 5mm sont des Composite Shell Element de formulation QBAT (éléments Batoz).

#### Simulation de la traction

#### • Modélisation :

• Conditions aux limites :

Encastrement de l'éprouvette à une extrémité pour représenter les mors de la machine de traction.

Pilotage par déplacement imposé à l'autre extrémité, chargement linéaire en 120ms.

• Post-traitement :

Déplacement relatif sur la longueur utile de l'éprouvette (représentatif de la corrélation d'image de l'essai).

Mesure de l'effort dans une section au centre de l'éprouvette.

Comparaison avec les courbes contrainte conventionnelle / déformation relative des essais Déformation à rupture analysée.



# • Comparaison essais / simulations





Figure 91 : Simulation de la traction à 90° à la vitesse de  $5^{E}$ -4 s<sup>-1</sup>



Figure 92 : Simulation de la traction à 45° à la vitesse de 5E-4 s<sup>-1</sup>

⇒ Le niveau de corrélation est jugé bon. La traction 45° n'est pas directement pilotée dans la loi ; elle est une résultante des directions 1 et 2 dont les paramètres ont été ajustés en fonction tout en assurant une bonne représentation des contraintes max aussi différentes pour l'essai à 0° (450 MPa) et à 90° (16 MPa). La rupture est bien positionnée.

Simulation de la compression

# • Modélisation :

• Conditions aux limites :

Mors non serrés. Encastrement direction YZ. Eléments rigides au niveau des perçages médian afin de représenter les pions présents en essai.

Pilotage par déplacement imposé suivant X.



Figure 93 : Modèle de simulation de la compression

• Post-traitement :

Post-traitement des déformations et mesure de l'effort sur le corps rigide.

Comparaison avec les courbes contrainte conventionnelle / déformation relative longitudinale des essais. Déformation à rupture analysée.

• Comparaison essais / simulations



Figure 94 : Simulation de la compression à 0° quasi-statique



Figure 95 : Simulation de la compression à 90° quasi-statique



Figure 96 : Simulation de la compression à 45° quasi-statique

 $\Rightarrow$  Le niveau de corrélation est jugé bon y compris à 45° pour un essai aussi difficile à mettre en œuvre et corréler. Le principe de pessimisme est respecté.

#### Simulation du cisaillement

#### **Modélisation :**

• Conditions aux limites :

Mors représentés par des corps rigides. Encastrement direction XZ. Rotation libre direction Z afin de représenter la liaison pivot en essai.

Pilotage par déplacement imposé suivant Y.



Figure 97: Modèle de simulation du cisaillement

Post-traitement : 0

Post-traitement des déformations de cisaillement dans le repère global sur plusieurs éléments de la zone cisaillée et mesure de l'effort sur le corps rigide.

Comparaison avec les courbes contrainte conventionnelle de cisaillement / déformation logarithmique de cisaillement des essais. Déformation à rupture analysée.



**Comparaison essais / simulations** 

**Figure 8 : Simulation du cisaillement à 0° quasi-statique** 







Figure 100 : Simulation du cisaillement à 45° quasi-statique

 $\Rightarrow$  Le niveau de corrélation est jugé bon pour un essai aussi difficile à mettre en œuvre et corréler ; y compris la pris en compte des comportements différents à +45° et -45° tout en restant cohérent par rapport à la traction 45°. L'endommagement est représenté dans Radioss sous la forme d'une perte de rigidité. Le comportement à 90°, par contre, est pessimiste.

Simulation de la flexion

- Modélisation :
  - Conditions aux limites :

Encastrement des deux appuis latéraux (cylindres inférieurs). Pilotage du poinçon par déplacement imposé suivant Z. Contacts avec friction entre les appuis / éprouvette et poinçon / éprouvette.



Figure 101 : Modèle de simulation de la flexion

• Post-traitement :

Post-traitement du déplacement du poinçon et de l'effort poinçon et transposition en contraintes/déformation théoriques.

Comparaison avec les courbes contraintes/déformation théoriques issues des essais. Déformation à rupture analysée.



#### **Comparaison essais / simulations**





Figure 103 : Simulation de la flexion à 90° quasi-statique



Figure 104 : Simulation de la flexion à 45° quasi-statique

 $\Rightarrow$  Le niveau de corrélation est jugé bon pour l'essai de flexion avec représentation des comportements traction/compression dans les couches. La rupture est plutôt bien positionnée pour les 3 directions d'essai en flexion tout en offrant une bonne corrélation aussi pour les essais unitaires de traction, compression et cisaillement. On reste conservatif à 45°.

Simulation de la flexion avec appuis rapprochés (cisaillement inter-laminaire)

# • Modélisation :

Conditions aux limites :
 Encastrement des deux appuis latéraux (cylindres inférieurs).
 Pilotage du poinçon par déplacement imposé suivant Z.
 Contacts avec friction entre les appuis / éprouvette et poinçon / éprouvette.



Figure 105 : Modèle de simulation de la flexion avec appuis rapprochés

• Post-traitement :

Post-traitement du déplacement du poinçon et de l'effort poinçon.

Comparaison avec les courbes efforts / déplacement machine des essais. Déformation à rupture analysée.



#### • Comparaison essais / simulations

Figure 106 : Simulation de la flexion avec appuis rapprochés à 0° quasi-statique



Figure 107 : Simulation de la flexion avec appuis rapprochés à 90° quasi-statique



Figure 108 : Simulation de la flexion avec appuis rapprochés à 45° quasi-statique

 $\Rightarrow$  On ne cherche pas à corréler cet essai car nous avons choisi de travailler en coques minces (shell) en vue de l'utilisation de gros modèles de calcul de véhicules. De fait, les phénomènes dans l'épaisseur ne sont décrits que par un nombre de paramètres limités (à ce jour, seule une approche avec des éléments volumiques, très coûteuse en temps de calcul, permettrait d'étudier ces phénomènes de cisaillement inter-laminaire ; à plus long terme, de nouvelles modélisations shell sont attendues sous Radioss et permettront d'introduire une meilleure description de ces phénomènes).



Figure 109 : à gauche, cisaillement inter-laminaire en essai ; à droite, modélisation shell

Cela étant, avec le choix de modélisation fait, les pentes de charge sont néanmoins respectées pour cet essai.

# Simulation d'essais supplémentaires de chocs multiaxiaux (CMA)

Les essais de traction en vitesse sur éprouvettes s'étant avérés difficiles à mettre en œuvre et à exploiter pour les vitesses de déformation supérieures, nous avons mis en place ces essais de choc multi axiaux à plusieurs vitesses d'impact.

### • Modélisation :

• Conditions aux limites :

Blocage en Z / encastrement des nœuds périphériques de la plaque. Masse du poinçon : 12,85 kg.

Pilotage du poinçon par vitesse initiale suivant Z (V=1,54m/s - 2,16m/s - 2,6m/s). Contact avec friction entre le poinçon et la plaque.



Figure 110: Modèle de simulation du choc multiaxial (CMA)

### • Post-traitement :

Post-traitement du déplacement du poinçon et de l'effort de contact poinçon/plaque. Comparaison avec les courbes charge / déflexion des essais. Déformation à rupture analysée.



#### • Comparaison essais / simulations





Figure 112 : Simulation du choc multi axial avec une énergie de 30J



Figure 113 : Simulation du choc multi axial avec une énergie de 45J

 $\Rightarrow$  Cet essai permet de mixer les comportements de traction-compression ainsi que l'endommagement dans les couches. Après l'essai de flexion, c'est l'essai qui nous a servi de vérification de la loi.

 $\Rightarrow$  Le niveau de corrélation est jugé bon : les efforts maxi, les allures de courbes dans la partie endommagement/rupture et les énergies des chocs sont bien représentés tout en restant conservatif.

#### Conclusion

Le niveau de corrélation de cette loi est jugé bon avec une bonne représentativité du comportement en traction, en compression et en cisaillement d'un matériau avec une aussi forte orthotropie.

Les essais de flexion et d'impact sont bien corrélés aussi avec représentation de la perte de rigidité liée à l'endommagement et la rupture tout en restant conservatif par rapport aux essais.

# 2. Cas du Sabic P108 (Polypropylène non chargé)

Ces essais sont les premiers réalisés de la matrice nécessaire pour caractérisation du P108. Le but premier de ce type d'essais est de servir pour la corrélation en reproduisant l'impact par simulation numérique.

# 2.1. Caractérisation complète du P108

### 2.1.1 Approche expérimentale

La matrice des essais sur matériau P108 a été proposée en considérant des essais de tractions (statiques et dynamiques), de flexion statique, de compression dynamiques et de choc multi axial.

Type d'essai		Norme	Nbre essais	Détails
Traction statique		ISO 527-2	5	
Flexion statique	Essais de caractérisation	ISO 178	5	
Traction dynamique		ASTM D1822	25	5 essais x 5 vitesses
Compression dynamique			12	3 essais x 4 vitesses
Choc multi axial	Essais pour corrélation	ISO 6603-2	15	5 essais x 3 niveaux d'energie

#### Tableau 5 : Récapitulatif du plan d'expérience

#### • <u>Traction statique :</u>

Essais réalisés suivant norme ISO 527-2 Essais réalisés à Température ambiante (23°C) Eprouvettes : injectées



Figure 114 : Allure de l'éprouvette





# • Flexion statique :

Essais réalisés suivant norme ISO 178 Eprouvettes : injectées Essais réalisés à Température ambiante (23°C)

Moyen d'essai :





Figure 116 : "Présentation du dispositif expérimental et allure de l'éprouvette





#### • <u>Traction dynamique :</u>

Essais réalisés suivant norme ASTM D 1822 Essais réalisés à Température ambiante (23°C) Eprouvettes découpées dans une plaque 100x100 mm :

Conditions d'essai :

5 tests par vitesse de traction Vitesses : 0.6 mm/min 0.01 m/s 0.1 m/s 1 m/s 3 m/s



Figure 118: "Présentation de l'éprouvette



Figure 119 : "Relation charge unilatérale (MPa) /Allongement relatif

# • <u>Compression dynamique :</u>

Essais réalisés suivant norme ASTM D 1822 Essais réalisés à Température ambiante (23°C)



Moyen d'essai : Système de barres d'Hopkinson et détail du four contrôlé :



#### Figure 120 : "Dispositif expérimental

#### P 108 en compression dynamique à 22 °C



Figure 121 : "Relation contraintes /déformations obtenues

#### • Choc multi axial :

Essais réalisés suivant norme ISO 6603-2 à Température ambiante ( $23^\circ C$ ). Conditions d'essai :

Diamètre du percuteur (2) : 20 mm Diamètre du support annulaire (4) : 40 mm 5 tests par énergie d'impact Eprouvettes (1) de 100x100 mm non découpées, épaisseur 4 mm

Afin d'avoir une base de corrélation nous permettant de couvrir la plus large plage de comportement de la matière, les essais sont réalisés avec 3 niveaux d'énergie différents. Apres mise au point par essais successifs, les 3 niveaux d'énergie retenus sont :

-195 Joules permettant la perforation complète de l'éprouvette

-40 Joules pour une grande déformation de la matière sans perforation

-5 Joules pour une faible déformation de la matière



Figure 122 : "Dispositif expérimental utilisés

# Résultats :

- Cas 1 : Energie 195 Joules :



Figure 123 : "Eprouvettes après impact





Essai avec perforation (Energie 195 J) Test with perforation (Energy 195 J)									
Votre réf <i>Your ref</i>			Sabic P108 HF10						
Eprouvet Sample	e Paramètres d'essai Test parameters	T (°C)	Epaisseur (mm) Données à la force maximal <i>Average data at max. force</i>			aximale force	Données moyennes à la perforation Average data at punture		Comportement mécanique du matériau
				Flèche Deflection Im (mm)	Energie Energy Em (J)	Force Energy Fm (N)	Flèche Deflection l p (mm)	Energie Energy Ep(J)	Mechanical behaviour
1	6603-2/40/20/C/4.4	23.0 °C	3.9	13.14	29.26	3878.0	20.50	53.03	YD
2	6603-2/40/20/C/4.4	23.0 °C	3.9	13.42	30.39	3857.5	20.50	52.86	YD
3	6603-2/40/20/C/4.4	23.0 °C	3.9	12.90	29.17	3864.4	20.31	52.96	YD
4	6603-2/40/20/C/4.4	23.0 °C	3.9	13.49	30.87	3837.1	20.40	52.53	YD
5	6603-2/40/20/C/4.4	23.0 °C	3.9	13.34	30.04	3816.6	20.41	52.19	YD
		L							
			Ecart-type	13.26 0.24	0.73	3850.7	20.42	0.35	<u> </u>



- Cas 2 : Energie 40 Joules :


#### Figure 125 : "Eprouvettes après impact



Figure 126 : "Réponse mécanique de la structure

	Essai sans perforation et déformation importante (énergie 40 J) Test without perforation and important deformation (energy 40 J)								
	Votre réf <i>Your ref</i>				Sabic P	108 HF10			
Eprouvette Sample	Paramètres d'essai <i>Test parameters</i>	T (°C)	Epaisseur (mm) <i>Thickness</i>	Données à la force maximale Données m Average data at max. force Average data		moyennes rforation ta at punture	Comportement mécanique du matériau		
				Flèche <i>Deflection</i> Im (mm)	Energie Energy Em (J)	Force Energy Fm (N)	Flèche <i>Deflection</i> 2p (mm)	Energie Energy Ep (J)	Mechanical behaviour
1	6603-2/40/20/C/2	23.0 °C	3.9	10.12	20.54	3502.5			
2	6603-2/40/20/C/2	23.0 °C	3.9	11.75	23.47	3455.0			
3	6603-2/40/20/C/2	23.0 °C	3.9	12.07	24.28	3423.1			
4	6603-2/40/20/C/2	23.0 °C	3.9	12.07	24.43	3434.5			
5	6603-2/40/20/C/2	23.0 °C	3.9	11.88	23.93	3432.2			
		+							
		+							┥───┤
			Movenne	11 58	23.33	3449.5			
L			Ecart-type	0.83	1.60	31.9			

Tableau 7 : "Récapitulatifs des caractéristiques mécaniques mesurées.

Cas 3 : Energie 5 Joules :



Figure 127 : "Eprouvettes après impact



Figure	128	: "Rép	onse	mécaniq	ue de	e la	structure
--------	-----	--------	------	---------	-------	------	-----------

Essai sans perforation et légère déformation (énergie 5.1 J) Test without perforation and small deformation (energy 5.1 J)									
	Votre réf <i>Your re</i> f		Sabic P108 HF10						
Eprouvette Sample	Paramètres d'essai <i>Test parameters</i>	T (°C)	Epaisseur (mm) <i>Thickness</i>	Données à la force maximale Donn Average data at max. force Average		Données à la pe <i>Average da</i> t	moyennes rforation ta at punture	Comportemen mécanique du matériau	
				Flèche Deflection Im (mm)	Energie Energy Em (J)	Force Energy Fm (N)	Flèche Deflection I p (mm)	Energie Energy Ep (J)	Mechanical behaviour
1	6603-2/40/20/C/1	23.0 °C	3.9	2.74	2.14	1604.5			
2	6603-2/40/20/C/1	23.0 °C	3.9	1.77	1.05	1672.7			
3	6603-2/40/20/C/1	23.0 °C	3.9	1.75	1.02	1659.1			
4	6603-2/40/20/C/1	23.0 °C	3.9	1.80	1.14	1665.9			
5	6603-2/40/20/C/1	23.0 °C	3.9	1.71	0.94	1679.6			
		+ +							
		+							
			Moyenne	1.95	1.26	1656.4			

Tableau 8 : "Récapitulatifs des caractéristiques mécaniques mesurées.

# 2.1.2 Approche numérique : identification de la loi matériau

# • <u>Méthodologie générale</u>

L'identification de la loi matériau est abordé par analyse inverse suivant un processus en deux étapes ; Une première étape qui vise à proposer caller un premier jeu de paramètres sur des essais éprouvettes. Ensuite, ce jeu de paramètre est amélioré par un second niveau de corrélation qui intègre l'ensemble des essais réalisés.



Des essais de caractérisation nous obtenons une première loi du P108. Cette loi est retravaillée par corrélation des essais de choc multi axial dédiés (avec différents niveaux d'énergie).

## • <u>Corrélation chocs multi axial :</u>

<u>Modélisation Radioss :</u> Plaque de dimension 100x100 mm et de 3.9 mm d'épaisseur en matériau P108. Formulation élémentaire: QEPH Taille de maille: 3 à 5mm Impacteur de diamètre 20 mm supposé infiniment rigide

<u>Conditions aux limites</u> Encastrement de la plaque sauf un disque de diamètre 40 mm sous l'impacteur



Chargement: 3 cas de charges					
Impacteur	Masse (kg)	Vitesse (m/s)	Energie (J)		
Cas 1: perforation	20.15	4.4	195.1 J		
Cas 2: grande déformation sans perforation	20.15	2	40.3 J		
Cas 3: légère déformation	10.15	1	5.1 J		

# • Résultats après optimisation de la loi matériau :

# - Cas 1 : Energie 195 Joules :

# Déformation :





<u>Commentaires :</u> Effort maxi (filtré) issu de simulation : 3860N Effort maxi essai : 3850 N ----> Ecart : 0.3 % Niveau de corrélation jugé très bon. - Cas 2 : Energie 40 Joules :

Déformation :



<u>Commentaires :</u> Effort maxi (filtré) issu de simulation : 3580N Effort maxi essai : 3450 N ----> Ecart : 3.8 % Niveau de corrélation jugé satisfaisant. - Cas 3 : Energie 5 Joules :

Déformation :



Commentaires :

Effort maxi (filtré) issu de simulation : 1713 N Effort maxi essai : 1656 N ----> Ecart : 3.4 % Niveau de corrélation jugé satisfaisant.

#### • <u>Corrélation chocs sur absorbeurs piéton:</u>

Des essais de choc avec impacteur cylindrique rigide sont réalisés sur des absorbeurs supérieurs injectés en P108. Moyen d'essai : Cylindre rigide diamètre 100mm, longueur 200mm et masse 5,495kg Vitesse 40 km/h



L'absorbeur est monté sur un avant véhicule. Résultats :



#### **Conclusion – Discussion :**

Les essais de caractérisation du matériau P108 nous ont permis d'initier le processus d'identification loi matière. La corrélation avec les essais de choc multi axial nous a permis de réaliser la première phase d'optimisation de la loi identifiée. Le niveau de corrélation obtenu est jugé très bon.

La deuxième phase d'optimisation de la loi matière est engagée avec la réalisation d'essai de choc sur pièces injectées en P108 (absorbeurs jambe piéton). Ces essais vont nous permettre de vérifier la pertinence de notre loi numérique par des corrélations calcul-essai.

# 2.2. Optimisation d'une structure en P108

La loi Radioss du matériau P108 a été optimisée à partir d'essais sur pièces réelles :

- choc sur absorbeur d'énergie
- choc jambe piéton réglementaire sur absorbeur intégré dans un bloc avant

Les simulations de ces essais et la corrélation associée ont permis de valider la loi du materiau P108.

# - Absorbeur de choc P108 :

Ecrasement de la pièce entre deux plans rigides :



Vitesse impacteur : 11,4 m/s

Deux positionnements de pièce testés : 0° et 10° par rapport à la direction de l'impact.

Diaporama essai à 10°:

Diaporama : Vue de Côté



Simulation :



Hypothèses de modélisation :

- Maillage fin de l'absorbeur : 4mm en moyenne (minimum à 3mm)
- Maillage fin (~ 5mm) de la platine et du mur mobile (homogénéité des interfaces avec l'absorbeur)
- Les épaisseurs dans l'absorbeur sont issues d'un rapport de mesure
- Platine et mur mobile rigides (corps rigides)
- Nœuds maitres des corps rigides de la platine et du mur mobile libres uniquement en translation selon X
- Masse du mur mobile : 976 kg
- Masse de la platine : 979 kg pour choc à  $0^{\circ}$ , 985 kg pour choc à  $10^{\circ}$
- Vitesse du mur : 11.43 km/h selon X
- Le pas de temps est imposé à 1µs
- Formulation des éléments : Belytschko 2ème ordre
- Les courbes sont filtrées avec un filtre CFC 180

Interface auto-impactante sur l'absorbeur :

Maillage fin : gap limité sur l'interface auto-impactante (pb de pénétrations initiales) Gap de l'interface auto-impactante égal à l'épaisseur mini dans l'absorbeur : **2mm** (ce gap correspond au gap max sans pénétrations initiales sut l'auto-impactante)

# - Corrélation du choc à 0°:



#### Avec loi P108 initiale (issue des corrélations éprouvettes)

Indice de corrélation (en %):

On se base sur plusieurs points de controle:

 $\Delta 1 = \text{écart}^*$  moyen sur les pics d'effort

 $\Delta 2 = \text{écart}^*$  moyen sur les pics (en abscisse)

 $\Delta 3 = \text{écart}^*$  moyen sur les creux d'effort

 $\Delta 4 = \text{\'ecart}^*$  moyen sur les creux (en abscisse)

 $\Delta 5 = \text{écart}^* \text{ sur l'enfoncement}$ 

 $\Delta 6 = \text{écart}^*$  sur le pic d'effort max

\* Les écarts sont calculés par rapport à la moyenne des valeurs obtenues aux essais

On définit alors l'indice de corrélation, en %, du calcul par rapport aux essais :

$$\Delta = \frac{\sum \Delta i}{6}$$

Voies étudiées pour la corrélation :

1- Facteur de raideur ( K ) : Le facteur de raideur K détermine le comportement numérique de l'interface entre impacteur et absorbeur notamment lorsque leur module de Young sont très différents.

• 
$$K = \frac{\text{Eesclave}}{\text{Emaitre}}$$
,  $Ksym = 1$    
•  $K = \frac{\text{Eesclave}}{\text{Emaitre}}$   
•  $K = \frac{\text{Eesclave}}{\text{Emaitre}}$   
•  $Ksym = \frac{\text{Emaitre}}{\text{Eesclave}}$   
•  $K = \frac{\text{Ksym}}{\text{Emaitre}}$ 

#### 2- Evolution de la loi matériau du P108 :

- introduction de déformation plastique à la rupture
- modification de la limite d'élasticité

## Loi matériau P108 originale (sans rupture) et variation sur K :



Madàla	Ecart
Widdele	calcul-essais
K majoré à 1	<b>22,03</b> %
K non majoré	20,45 %

Quelque soit le K, la modélisation est inappropriée.



# Nécessité de modifier la loi matériaux du P108, en introduisant tout d'abord de la rupture.

<u>Variation sur la rupture, K non majoré :</u> On détermine la rupture optimum pour la loi originale du P108.

Rupture ( % de déformation plastique	Ecart calcul-essais (%)
70	18,46
80	16,84
90	16,06
110	17,09



La rupture optimum est à 93,86 % de déformation plastique.

Introduction d'une rupture arrondie à 90 % dans la loi originale du P108

Introduction de la rupture (90% de déformation plastique) dans la loi originale du P108, variation de K :



Modèle	Ecart calcul-essais		
K majoré à 1	18,46 %		
K non majoré	16,06 %		

Les pics et les creux sont nettement plus marqués avec de la rupture dans la loi matériau du P108.

Poursuite de la corrélation avec le modèle dont le facteur de raideur K n'est pas majoré. Itérations sur la limite d'élasticité de la loi du P108

Variation sur la limite d'élasticité, rupture à 90% de déformation plastique, K non majoré :

Détermination de la limite d'élasticité optimum pour le P108 :

Limite	Ecart
d'élasticité (MPa)	calcul-essais (%)
4,24	16,06
6,5	11,62
7,5	11,33
8	10,12
8,32	10,35
8,6	11,1
8,74	10,71
8,83	9,81
8,88	11,53
9,02	10,81
9,3	11,63
10	11,77
11.24	15.12



La limite d'élasticité optimum est de 8,22 MPa. Nouvelle itération sur la rupture pour valider le couple limite d'élasticité / rupture

Variation sur la rupture, limite d'élasticité à 8,22 MPa, K non majoré :

Détermination de la rupture optimum pour la limite élastique à 8,22 MPa.

Rupture ( % de	Ecart		
déformation	calcul-essais		
plastique	(%)		
70	13,35		
80	11,08		
90	9,99		
100	11,08		
120	15,72		



La corrélation est optimum avec le couple: limite d'élasticité = 8,22 MPa rupture = 90 % de déformation plastique

Loi matériau optimisée du P108 :



		Détail des écarts calcul-essais	valeur (%)
		écart sur les pics d'effort	9,4
		écart sur les pics (abscisse)	3,4
		écart sur les creux d'effort	34,4
Modèle Ecart (%) K non majoré 9,99		écart sur les creux (abscisse)	8,7
		écart sur le pic d'effort max	2,8
		écart sur l'enfoncement	1,3

Le pic max et l'enfoncement sont très légèrement supérieurs à la moyenne des essais (favorable). L'écart sur les creux fait chuter l'écart global calcul-essais.





	Energie dissipée kJ
Moyenne essais	2308,5
Calcul	2468,4

6,9 % d'écart

L'énergie dissipée au calcul est légèrement supérieure à l'énergie moyenne dissipée aux essais.



#### Variation sur le facteur de raideur K, avec la loi du PP corrélée : Effort / Enfoncement

	Ecart
Modèle	calcul-essais
	(%)
K majoré à 1	13,97
K non majoré	9,99

Avec la loi corrélée, la conclusion reste identique :

Un facteur de raideur non majoré sur les interfaces "mur/absorbeur" et "platine absorbeur" donne une meilleure corrélation.

# - Introduction de la loi corrélée du PP pour le choc à $10^\circ$ :



Détail des écarts calcul-essais	valeur (%)		
écart sur les pics d'effort	9,5		
écart sur les pics (abscisse)	3,5		
écart sur les creux (norme)	39,9		
écart sur les creux d'effort	30,7		Ecart
écart sur le pic d'effort max	6,2	Modèle	calcul-essais
écart sur l'enfoncement	0,9	K non majoré	(*/) 15,11

Comme dans le choc à 0°, ce sont les écarts sur les creux qui font baisser l'écart moyen par rapport aux essais.

## Energie dissipée pendant le choc à 10° (loi optimisée du PP):



L'énergie dissipée au calcul est légèrement supérieure à l'énergie moyenne dissipée aux essais.

Vérification de la loi sur absorbeur modifié (suppression des nervures 1 et 3) en choc  $10^{\circ}$  à 11,43 km/h :



4 4 A



Détail des écarts calcul-essais	K majoré à 1 (%)	K non majoré (%)		
écart sur les pics d'effort	5,1	2,7		
écart sur les pics (abscisse)	8,6	9,5		
écart sur les creux d'effort	32,7	32,8		
écart sur les creux (abscisse)	12,6	10,2	Modèle	Ecart
écart sur le pic	7.2	3.6	K majoré à 1	calcul-essais (%)
d'effort max	· · ·	- ,		11,52
écart sur l'enfoncement	7,8	10,2	K non majoré	12,34

<u>Vérification de la loi sur absorbeur modifié (suppression des nervures 1, 2, 3 et 4) en choc  $10^{\circ}$  à 11,43 km/h :</u>





#### Conclusion de la corrélation sur absorbeur d'energie :

Une corrélation convenable de l'absorbeur sur les chocs à 0° et 10° à la vitesse de 11,43 km/h, a été atteinte en modifiant la loi matériau du P108. On a vu, de plus, que le facteur de raideur avait une influence non négligeable sur les résultats.

# Absorbeur piéton P108 :

Objectif : Vérifier la validité de la loi P108 sur des pièces participant au choc jambe piéton **Pièces étudiées** : Absorbeurs piéton (voie haute et basse ) intégrés sur un avant véhicule. A noter qu'il s'agit d'un véhicule non prévu pour le choc piéton et pour lequel des maquettages spécifiques ont été faits.





<u>Type d'essai :</u> choc jambe piéton réglementaire.



Impacteur jambe réglementaire :





# <u>Résultats :</u>



	Test	Simulation	% différence
Décélération (g)	99	107	7,4
Flexion (°)	17,5	16,6	5,1
Cisaillement (mm)	1,6	1,55	3,1

# **Conclusion :**

La dernière corrélation donne satisfaction

La loi Radioss du P108 obtenue donne un très bon niveau de prédiction