

# Projet Mosaïc : structure automobile en composites et aluminium

**Piloté par Renault, en partenariat avec six fabricants européens, le projet Mosaïc, avec la Clio pour référence, permettrait un allègement de 20 % à un coût acceptable et sans concéder en qualité ni en sécurité.**

## Introduction

Comment alléger les véhicules pour réduire leur consommation et leurs émissions polluantes ? Comment diminuer leur prix de revient pour rentabiliser de petites séries ? Une question à l'ordre du jour pour les constructeurs automobiles de plus en plus soumis aux contraintes réglementaires ou économiques. S'il est possible d'appliquer un régime minceur aux carrosseries par l'emploi des thermoplastiques comme par exemple le Noryl pour les ailes de la Mégane et de la Clio, les pièces de structure offrent un potentiel encore peu exploité.

Le projet Mosaïc a reçu le label Eurêka en juin 1991. L'étude de faisabilité, première étape du projet, a conduit à sélectionner deux voies d'investigation.

## La voie du progrès continu : mieux utiliser l'acier

La première voie explorée par Mosaïc consiste tout simplement à mieux utiliser l'acier. L'objectif poursuivi dans ce scénario de progrès continu est de repousser les limites de poids et de résistance de l'acier actuellement utilisé sur les véhicules de la gamme. Les améliorations de l'acier ont permis de trouver un gisement d'allègement de l'ordre de 10 % grâce à l'utilisation des *acières à haute limite d'élasticité* (HLE) : ils offrent une résistance supérieure à celle des aciers traditionnels et donc autorisent l'emploi de tôles plus fines.

De même, l'utilisation de tôles sandwich pour le soubassement amène à réduire la masse de la structure tout en améliorant l'insonorisation du véhicule. Constituée de

deux couches d'acier minces séparées par un film polymère d'environ 45 µm, la tôle sandwich possède un coefficient d'amortissement vibratoire suffisant pour permettre la suppression des insonorisants en feuille fusible appliqués sur les tôles classiques.

## La rupture technologique : une structure hybride en aluminium et composites

L'innovation apportée par cette deuxième voie consiste en l'abandon de l'acier au profit d'une solution multimatériaux pour réaliser une structure hybride à base d'aluminium et de composites. La démarche conduit à utiliser le matériau le mieux adapté à une fonction de manière à réaliser une structure offrant le meilleur compromis poids-performances-coûts.

En lançant Mosaïc en 1990, Renault s'était fixé pour objectif de définir une structure plus légère, donc plus performante en termes de consommation et de protection de l'environnement, recyclable et mieux adaptée à la diversité de gamme aujourd'hui recherchée par les clients.

Pour y parvenir, Renault s'est associé au sein d'un **programme Eurêka** avec de grands groupes européens, tous leaders dans leur domaine de compétence : Sollac (France) pour les aciers, Ciba-Geigy (Suisse) pour les adhésifs structuraux, DSM (Pays-Bas) pour les composites SMC, Enichem et Montedison (Italie) pour les composites S-RIM, Hydro-Aluminium (Norvège) pour les alliages légers en aluminium.

## La concurrence, une incitation au développement

Les polymères renforcés par des fibres courtes ou continues sont considérés comme des matériaux ayant des possibilités importantes dans de nombreuses applications où des comportements structurels sont exigés. De nombreux exemples font la preuve que cette famille de matériaux a été largement étudiée, notamment dans le secteur automobile.

Dans le passé, plusieurs constructeurs ont réalisé des études portant sur l'utilisation des matériaux composites dans les structures automobiles, citons quelques exemples significatifs.

## Les constructeurs européens

**BMW** a réalisé un roadster Z1 avec un châssis autoporteur en acier zingué équipé d'un plancher sandwich avec une âme en polyuréthane rigide et deux parois en verre-époxydes.

**Peugeot** a lancé en 1987 le projet Carmat orienté sur les matériaux de synthèse pour les pièces de carrosserie (capot, pavillon, ailes, portes latérales), et sur les matériaux composites sandwich structural de forte épaisseur (~ 15 mm) pour la fonction plancher.

**Renault** a dans un passé récent commercialisé l'Alpine V6 comportant un châssis hybride acier-composites avec une peau en stratifié polyester. L'Espace est réalisé depuis

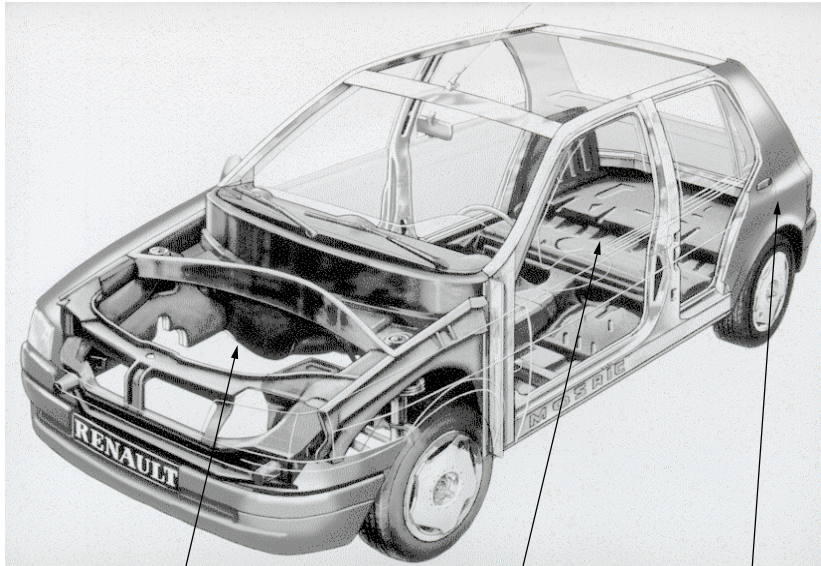
## Aux États-Unis

Les trois principaux constructeurs américains ont étudié à partir des années 1980 des solutions innovantes :

**GM** a commercialisé 2 modèles de voiture utilisant largement les composites : la Pontiac Fiero et la Chevrolet Corvette avec une structure « cage d'oiseau » en acier et une carrosserie en SMC pour les pièces horizontales et en R-RIM (Reinforced-Reaction Injection Molding) pour les parties verticales. La production annuelle était de 150 000 véhicules.

**Ford** a présenté en 1979 un véhicule test dont la structure était en composites renforcés par des fibres de carbone et de verre. En 1986, Ford a utilisé ces matériaux sur le plancher d'une version de l'Escort. Plus récemment, le van Tran-Sport est réalisé selon la technique de la structure hybride acier-composites et peau en polyester collée.

Ainsi, on constate une volonté forte parmi les constructeurs d'étudier, voire même de commercialiser des véhicules présentant des éléments composites participant plus ou moins à la structure. Cette analyse a conforté Renault dans sa démarche de créer un concept de véhicule fondé sur l'utilisation des « multimatériaux ».



Bloc avant en composites

Plancher en composites

Superstructure en aluminium

Figure 1 – Structure hybride Mosaïc

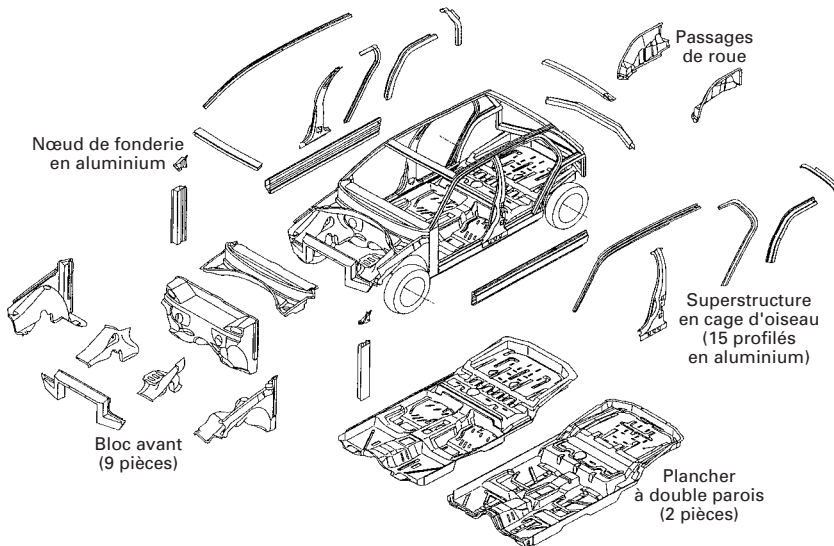


Figure 2 – Vue éclatée de la structure

10 ans avec une carrosserie entièrement en composite (SMC) collée sur une structure tubulaire en acier zingué.

**Volvo** a étudié avec le projet LCP 2000 une conception modulaire constituée d'une struc-

ture en aluminium, des organes en magnésium et une carrosserie en SMC ainsi que des vitrages en polycarbonate. Le gain de poids était évalué à 25 %.

## Le projet Mosaïc : cinq objectifs

Les objectifs techniques du projet Mosaïc portent principalement sur la faisabilité industrielle et les gains potentiels apportés par l'introduction de matériaux différents de l'acier tels que l'aluminium et les composites pour réaliser la structure d'une automobile. Ils peuvent se résumer en cinq points :

- obtenir un allègement de 20 % à 30 % de la structure par rapport à la Clio acier afin de contribuer à la réduction de la consommation ;

- simplifier le processus industriel par une réduction significative du nombre de pièces et ainsi contribuer à améliorer la productivité de l'Entreprise ;

- augmenter la diversité des caisses pour mieux répondre aux souhaits des consommateurs désireux de pouvoir choisir parmi plusieurs variantes bien typées (berline, coupé, cabriolet, pick-up, van, break, monospace, etc.) ;

- valider les choix de nouveaux matériaux d'une part en réalisant des modélisations à l'aide de codes de calcul appropriés et

d'autre part en effectuant les essais fonctionnels standards sur véhicules prototypes ;

— prendre en compte dès la conception la protection de l'environnement par des propositions de recyclage des matériaux et des analyses du cycle de vie.

## La conception d'une structure automobile

### La structure traditionnelle en acier

Le développement d'un véhicule est aujourd'hui parfaitement maîtrisé par les ingénieurs des Bureaux d'études. Les principales difficultés portent sur la conception d'un produit innovant dans sa fonctionnalité d'usage et sur un style à fort impact émotionnel pour le client.

La structure traditionnelle est constituée par une caisse autoporteuse réalisée en tôles d'acier généralement de 0,7 mm d'épaisseur assemblées par soudage par point. La mise au point d'une caisse conventionnelle est réalisée à l'aide d'un logiciel de dynamique rapide, Radioss, permettant de calculer les contraintes et les déformations d'une structure soumise à de grands déplacements et dont le matériau constitutif atteint un état plastique.

La réglementation automobile, le niveau de gamme et les concepts des designers définissent les dimensions et le style d'une voiture. Les règles de l'art tirées de l'expérience des véhicules précédents permettent d'affiner l'architecture et le dimensionnement de la caisse et des différentes fonctions structurales (berceau, train, supports moteurs, etc.).

Les aciers utilisés sont bien connus et les propositions d'évolution ne concernent aujourd'hui que leur optimisation pour obtenir des gains en propriétés mécaniques, en poids ou en coût.

Il était donc intéressant de vouloir rompre avec ce schéma traditionnel et de se tourner vers une rupture tant sur les matériaux que sur le concept même de structure.

### La conception innovante de Mosaïc

Le périmètre du projet ne concerne que la structure autoporteuse, c'est-à-dire la caisse

en blanc sans les ouvrants. En effet, Renault maîtrise parfaitement la fabrication d'ouvrants ou d'éléments de carrosserie en thermoplastiques ou thermodurcissables comme par exemple la carrosserie de l'Espace ou les caissons de portes arrières de l'Express, les ailes de la Mégane Scénic ou les cabines de véhicules industriels.

La **Clio** est prise comme référence pour toute l'étude tant sur les aspects techniques qu'économiques car ce véhicule est représentatif d'une production en grande série (2 000 véhicules par jour) sur un marché fortement concurrentiel.

Le projet a abouti à la réalisation de 6 prototypes roulants testés selon les mêmes critères que ceux des véhicules de série.

L'étude préliminaire d'architecture est réalisée à partir d'un maillage par éléments finis de la Clio. Le volume compris entre la surface extérieure représentée par la carrosserie et la surface intérieure, définie par l'habitacle et le compartiment moteur, est un volume disponible pour introduire des matériaux différents de l'acier.

À partir de ce volume disponible, plusieurs solutions de découpage ont été étudiées afin de respecter au mieux les contraintes du cahier des charges fonctionnel du véhicule.

### Un découpage fonctionnel en trois parties

La version retenue (figure 1) est caractérisée par un découpage de la structure en trois parties :

— le **bloc avant** dont le périmètre s'étend du bouclier jusqu'au tablier ; il comprend le compartiment moteur, le berceau support du train avant, la séparation avec l'habitacle, la fonction face avant intégrant le support du groupe motoventilateur ;

— le **plancher monolithique** débutant au bloc-pédales et finissant à la jupe arrière ; il comprend les passages de roues arrière, les fixations du train arrière et celles des sièges des passagers ;

— la **superstructure** représentée par une « cage d'oiseau » intégrant les bavolets, les montants latéraux, le pavillon et les custodes latérales.

Les ouvrants (portes, capot et hayon) et la mécanique ont été repris de la Clio afin de permettre la réalisation d'un véhicule complet avec une **carrosserie en acier**.

Chaque bloc de la structure a été étudié avec un partenaire choisi selon sa capacité à maîtriser la conception automobile et détenir en interne des compétences en matière de calculs de structure, à posséder des technologies avancées dans le domaine des matériaux et de leurs procédés de transformation, à apporter la preuve de partenariats réussis avec d'autres constructeurs automo-

biles au niveau mondial, à détenir enfin une assise financière suffisante pour supporter une étude d'une telle ampleur.

Dans ces conditions, il a été proposé à DSM (Pays-Bas) d'étudier le bloc avant, aux groupes Montedison et Enichem (Italie) de prendre en compte le plancher et à Hydro-aluminium (Norvège) de réaliser la superstructure. La vue éclatée (figure 2) montre la constitution de chaque bloc et la décomposition en pièces élémentaires. Elle met particulièrement en évidence le faible nombre de pièces nécessaires pour réaliser l'ensemble.

### Les partenaires réalisent et Renault assemble

Chaque partenaire a proposé des schémas d'architecture du sous-ensemble dont il était responsable. Il a également étudié la formulation des matériaux et déterminé leur mode de transformation. Il a ensuite mis en œuvre la réalisation des pièces prototypes et leur assemblage.

Renault a assumé la responsabilité de la cohérence de l'architecture générale, du choix d'une ou plusieurs solutions concernant les parties de l'implantation des organes mécaniques et de la carrosserie puis des validations au travers des essais fonctionnels.

### Le bloc avant : la tenue au choc

La solution proposée par DSM pour le bloc avant tient compte principalement des exigences réglementaires fondées sur la tenue aux chocs selon trois niveaux d'exigence.

● **Choc à 5 km/h** : essai réalisé conformément à la directive européenne ECE 42. Le choc doit être entièrement repris par le bouclier avant avec absence complète de défauts visibles ou cachés.

● **Choc à 15 km/h** : essai propre aux compagnies d'assurance destiné à apprécier les coûts de réparation et donc le niveau des primes d'assurance. L'essai consiste à provoquer l'impact du véhicule contre un mur rigide. Le choc est repris par un système d'absorbants sous forme de cônes en composites BMC qui, grâce à la ruine progressive du matériau, permettent une absorption d'énergie suffisante sur les premiers 100 mm d'écrasement.

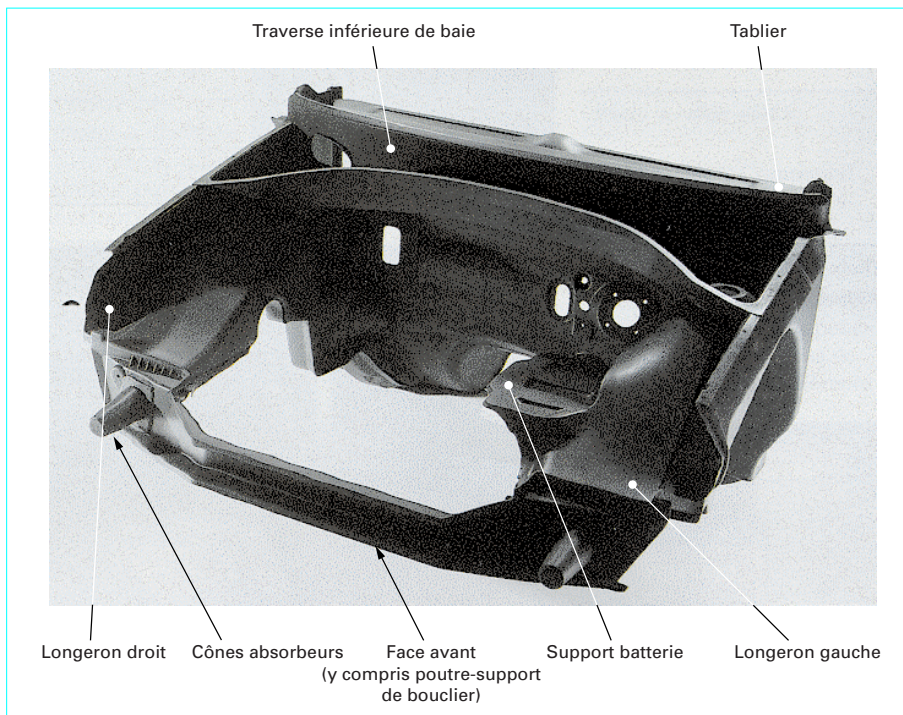


Figure 3 – Bloc avant composite

● **Choc à 50 km/h** : essai consistant à projeter frontalement le véhicule contre un mur conformément à la directive ECE 12. Pour être conforme, il faut que l'habitacle conserve son intégrité, que le déplacement du tablier soit inférieur à 150 mm et celui du volant inférieur à 127 mm. Les portes doivent rester fermées et pouvoir s'ouvrir après le choc.

Le niveau de décélération doit être tel que les passagers – représentés par des mannequins instrumentés – conservent leur intégrité physique. Cela se traduit par une décélération maximale admise au niveau de la poitrine de 60 g (avec g accélération due à la pesanteur). La force exercée au niveau du fémur doit être inférieure à 10 kN.

Afin de respecter ces critères, le principe retenu est celui de l'absorption de l'énergie cinétique par le bloc avant et le début du plancher grâce à la capacité des composites à absorber l'énergie sous forme d'une destruction progressive du matériau.

Le bloc avant (figure 3) est constitué de 9 pièces principales se décomposant comme suit :

- 2 longerons comprenant les passages de roues, les chapelles et les fixations du berceau et du groupe moto propulseur ;
- 2 fermetures de longerons afin de créer un effet de poutre à grande inertie ; les longerons supportent des contraintes mécaniques

élevées telles que les efforts de couple du bloc moteur, les efforts verticaux du train avant et surtout les contraintes des chocs ;

- 1 support de batterie intégré dans le longeron gauche ;
- 1 traverse inférieure de baie assurant la raideur entre les chapelles et l'accostage du pare-brise ;
- 1 tablier multifonctionnel séparant l'habitacle passager du compartiment moteur ;
- 1 poutre support de bouclier ;
- 1 face avant semi-structurale assurant le rôle de support des lanterneries, du radiateur et du capot moteur.

**Nota** : les chapelles sont des éléments de structure qui permettent la fixation de la partie supérieure des amortisseurs.

À ces pièces principales, il faut ajouter 2 cônes en composites fixés sur la poutre au droit des longerons destinés à absorber l'énergie lors de chocs à faible vitesse (< 15 km/h).

Le découpage du bloc avant est étudié pour permettre un assemblage par collage et une bonne répartition des contraintes. Les longerons et leurs renforts sont dimensionnés pour commencer à se déformer après la ruine complète des cônes et poursuivre l'absorption d'énergie pour des vitesses d'impact supérieures à 15 km/h.

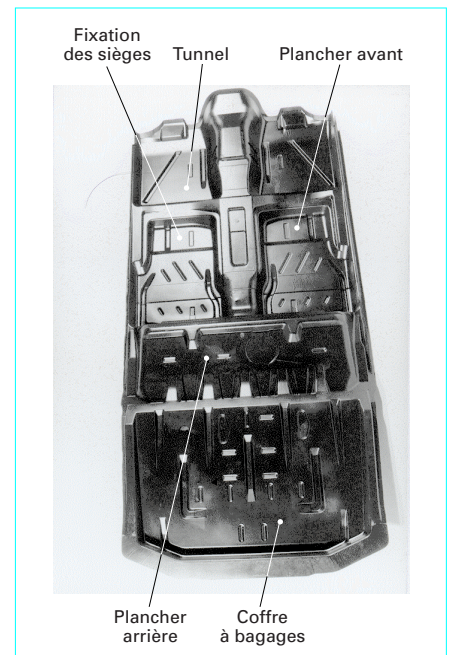


Figure 4 – Plancher composite

Le bloc avant présente des particularités techniques qu'il est intéressant de souligner, telles que :

- une liberté de conception des matériaux composites permettant grâce à l'intégration de fonctions une réduction de 90 % du nombre de pièces du bloc avant ;
- des caractéristiques mécaniques plus faibles que celles des métaux mais compensées par des effets de poutre à double parois afin d'augmenter l'inertie ;
- des avantages de conception multiples comme par exemples : la suppression des nervures et des contre-dépouilles, les épaisseurs constantes ou avec des variations mineures et progressives (la plage choisie variant de 2,5 à 4 mm pour favoriser le fluage de la matière), des interfaces à double parois et des structures caissonnées, des liaisons continues collées et si nécessaire une participation d'éléments métalliques tels que des inserts reprenant les efforts locaux.

## Un plancher composite monolithique

La solution retenue est un plancher d'un seul tenant (figure 4) à double parois. Il est constitué de 4 pièces principales : 2 parois assemblées par collage et 2 passages de roue également collés sur le plancher et le côté de caisse.

La logique de conception du plancher à double parois est, là aussi, fondée sur l'obtention de la plus grande inertie possible pour un minimum de poids. Des inserts – composites pultrudés ou profilés d'aluminium – intégrés entre les parois assurent la reprise des efforts du train arrière, des sièges et des ceintures de sécurité.

Des recherches spécifiques sur les technologies de transformation ont été rendues nécessaires pour permettre le moulage d'éléments de grandes dimensions avec une reproductibilité satisfaisante des caractéristiques, selon une cadence de production d'au moins douze parois de plancher par heure et par moule et des coûts de production acceptables pour l'industrie automobile.

Les expériences précédentes de l'industrie automobile européenne dans ce domaine ont été limitées à l'industrialisation d'éléments de petites dimensions telles des poutres de bouclier, des coques de siège, des tableaux de bord ou logements de roue de secours. En revanche, des applications en grande série pour des éléments de grandes dimensions et de haute complexité, tels le plancher structural envisagé dans ce projet, étaient à peu près inconnues.

## La cage d'oiseau, superstructure en profilés d'aluminium

La « cage d'oiseau » servant de superstructure est réalisée principalement à partir de profilés en aluminium (figure 2). Elle est constituée de :

- 15 profilés : destinés à la structure des côtés de caisse et traverses ;
- 2 pièces de fonderie : servant de nœuds de liaison entre le pied avant et brancard ;
- 10 tôles : pour l'embotissage des pieds milieux, panneaux latéraux, jupe arrière et pavillon.

L'assemblage des pièces en aluminium utilise la technique du soudage au cordon. Le principe de ce procédé consiste à élever la température des deux pièces à souder jusqu'à fusion à l'aide d'un arc électrique produit entre une électrode et ces pièces. Dans le procédé MIG (Métal Inert Gas), l'électrode, consommable, est le métal d'apport sous forme de fil d'aluminium.

Dans le procédé TIG (Tungsten Inert Gas) l'électrode, non consommable, est en tungstène. Le métal d'apport est sous forme d'une baguette d'aluminium additionnelle.

## Le collage, un moyen universel d'assemblage

La diversité des matériaux a conduit à utiliser de nombreux moyens d'assemblage tels que les fixations mécaniques par boulonnage ou rivetage, le soudage de l'aluminium au cordon, le collage des composites, etc.

Le collage est un moyen universel d'assemblage de matériaux de nature très différente. Il confère les propriétés d'une liaison continue aux pièces assemblées : amélioration de la raideur et de l'endurance par rapport à un assemblage par points grâce à la répartition des contraintes le long de la liaison. Cependant, la tenue du joint collé peut être dégradée par la température, les agressions extérieures, le vieillissement de l'adhésif dans le temps ou par des efforts importants transisant entre les pièces (chocs par exemple). L'ajout de rivets à des liaisons collées permet de compenser ces insuffisances.

Le collage ne concerne pas uniquement la formulation de l'adhésif lui-même mais comprend la conception de l'ensemble du système, c'est-à-dire :

- les traitements de surface des supports à encoller afin de conférer aux surfaces en présence des aptitudes à l'adhérence ;
- le mode d'application tributaire du système réactif de l'adhésif ;
- la technique d'assemblage et de maintien des pièces pendant la durée de réticulation ;
- le mode d'apport d'énergie pour provoquer le durcissement rapide de l'adhésif.

Les lignes d'assemblage actuelles des véhicules de gamme sont programmées à 60 véhicules/h. L'assemblage de véhicules Mosaic doit donc suivre la même cadence, ce qui nécessite de disposer d'un processus d'assemblage par collage adapté à cette contrainte industrielle.

La Direction de la Recherche de Renault a étudié un mode de réticulation des adhésifs permettant d'atteindre des temps de cycle de l'ordre de 100 s en utilisant un système de chauffage rapide soit par induction pour les supports en aluminium, soit par chauffage haute fréquence pour les supports en composites.

Des solutions industrielles ont été étudiées pour chacune de ces exigences et ont été employées pendant l'avancement du projet.

Les préconisations de conception destinées à fiabiliser la qualité des assemblages collés sont encore très empiriques [1]. Quelques règles ont été mises en évidence issues de l'expérience et confirmées par les résultats d'essais :

- Il n'est pas nécessaire que les largeurs de collage dépassent 15 mm pour que les

efforts transitent correctement dans le joint de colle ;

- Il est préférable de privilégier les efforts en cisaillement afin d'augmenter la résistance mécanique ;

— Il faut créer des butées positives pour maîtriser l'épaisseur du joint de colle et éviter son écrasement lors de l'accostage des pièces ;

— Les dispersions géométriques doivent être intégrées dans le joint de colle, l'épaisseur optimale étant de  $1 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$  ;

— Il est impératif de prévoir un traitement de surface des pièces à coller en facilitant l'accès aux zones à accoster ;

— Il faut éviter que les pièces et le montage d'assemblage ne provoquent le raclage de l'adhésif au moment de la mise en contact des surfaces à assembler.

Les adhésifs utilisés doivent répondre à un cahier des charges dont les principales exigences sont :

- une résistance au cisaillement élevé de 15 à 20 MPa ;
- une flexibilité conservée à  $-20 \text{ }^\circ\text{C}$  et une bonne ténacité à  $+80 \text{ }^\circ\text{C}$  ;
- une résistance à la fatigue supérieure à 2 millions de cycles ;
- une bonne aptitude à absorber l'énergie au cours d'un choc ;
- une résistance au vieillissement et à la corrosion des matériaux.

Le traitement de surface de l'aluminium et des composites est nécessaire. C'est un facteur déterminant pour assurer la fiabilité et la durabilité des joints collés : les supports aluminium subissent un sablage actif spécifique avec application d'un primaire d'adhérence avant encollage, les supports en composites subissent un sablage simple suivi d'un dépoussiérage et un nettoyage au solvant.

L'assemblage général des éléments de la structure a été réalisé avec des adhésifs de Ciba Geigy qui a proposé un adhésif structural **bicomposants à base d'époxydes** à faible allongement (environ 10 %).

Afin de compléter les connaissances sur les adhésifs, le collage composite/composite a été réalisé avec des **colles bicomposants polyuréthanes** de Gurit Essex à fort allongement (100 %). Cette solution a été appliquée pour l'assemblage des pièces en SMC du bloc avant et celles en S-RIM du plancher.

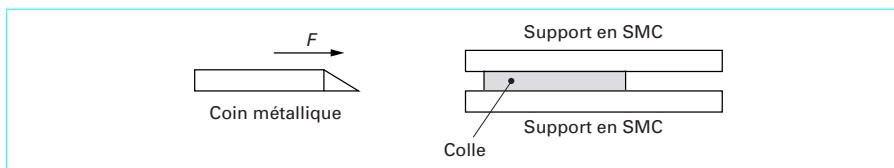
Les résultats comparés obtenus sur les deux types de colle (tableau 1) montrent des comportements très voisins malgré une composition chimique et un comportement mécanique très différents.

**Tableau 1 – Comparaison des colles d'assemblage**

| Caractéristiques                                 | Colle époxyde |     | Colle polyuréthane |     | Objectifs    |         |
|--|---------------|-----|--------------------|-----|--------------|---------|
| Module d'Young..... (MPa)                        | 1500          |     | 100                |     |              |         |
| Contrainte de rupture en cisaillement..... (MPa) | 24            |     |                    |     |              |         |
| Allongement à rupture..... (%)                   | 12            |     | 100                |     |              |         |
| Épaisseurs de colle ..... (mm)                   | 0,2           | 2   | 0,2                | 2   | 0,2          | 2       |
| Résistance à la traction..... (MPa)              | 9             | 6   | 10                 | 4,8 | ≥ 10         | ≥ 5     |
| Énergie de rupture au choc.....(J)               | 4,4           | 7,3 | 7                  | 7   | ≥ 4          | ≥ 7     |
| Type de rupture lors du choc (1).....            | RC            | RCS | RDS                | RDS | sauf RA      | sauf RA |
| Clivage au coin (2).....                         | RCS           |     | RCS                |     | tous sauf RA |         |

(1) Rupture adhésive RA : séparation complète de la colle et du support  
 Rupture cohésive RC : rupture dans le joint de colle  
 Rupture cohésive superficielle RCS : rupture à l'interface support-colle laissant une mince couche superficielle d'adhésif sur le support  
 Rupture par délaminage du support RDS : rupture dans le matériau support.

(2) Test consistant à introduire un « coin biseauté » entre les deux supports collés en appliquant un effort de clivage. Le résultat s'apprécie par le type de rupture observé (figure 5).



**Figure 5 – Principe de l'essai de clivage au coin**

Les caractéristiques du SMC mesurées sur éprouvettes prélevées sur plaques de 3 mm (tableau 2) présentent deux particularités intéressantes :

- une limite de fatigue de 70 MPa nettement supérieure à la contrainte maximale mesurée au niveau de la fixation des amortisseurs en haut de chapelle de l'ordre de 50 MPa ;
- une température de transition vitreuse de 195 °C qui assure une très bonne résistance thermique des pièces situées dans le compartiment moteur.

Les cônes absorbeurs d'énergie en BMC (Bulk Moulding Compound) à base de résines polyesters classiques présentent des caractéristiques plus faibles, ce qui facilite la réduction de l'effort de ruine initial et amorce la rupture au niveau du sommet du cône.

Le moulage par compression des pièces prototypes en SMC a été effectué sur des presses industrielles dans des outillages métalliques en zamak contrôlés géométriquement.

L'écoulement du matériau a été mis au point avec PLASTEC, logiciel de simulation de l'écoulement dans le moule, que la société DSM a étudié avec Techanalysis (USA). Il est possible de déterminer avant le moulage la découpe et la mise en place de l'ébauche de SMC, ainsi que l'orientation des fibres de verre pour permettre le contrôle de l'anisotropie des matériaux.

Un système d'acquisition de données est raccordé à la presse et au moule par l'intermédiaire de capteurs de pression, de température et de déplacement pour obtenir des informations concernant le fluage et la réticulation du matériau. Ces informations permettent d'optimiser la cadence de production. Ainsi des temps de cycle de 60 s ont été obtenus sur les pièces les plus petites (support de batterie), et de 90 s pour les pièces de grande dimension comme le tablier ou le longeron.

## Le choix des matériaux composites

Les matériaux composites ont été choisis en fonction de critères technico-économiques permettant de fabriquer les pièces dans des conditions réalistes en s'appuyant sur les moyens existants dans le tissu industriel européen. Leur mode de transformation devait être des techniques bien maîtrisées pour l'industrie automobile ou dont le développement était suffisamment avancé et prometteur pour justifier leur utilisation. Les propriétés mécaniques et d'usage devaient permettre d'obtenir un comportement fonctionnel en cohérence avec les cahiers des charges du constructeur. Les prix de revient et les coûts d'investissements devaient être inférieurs ou identiques à ceux de l'acier.

Ces critères de choix ont conduit à privilégier les **composites renforcés par des fibres de verre** plutôt que les composites hautes performances à base de fibres de carbone ou de Kevlar. Nous verrons que les propriétés des composites de moyenne performance sont suffisantes pour répondre aux exigences fonctionnelles.

## Quels matériaux pour le bloc avant composite ?

Le procédé de transformation retenu par DSM pour réaliser les 9 pièces du bloc avant est le procédé SMC (Sheet Moulding Compound) déjà largement utilisé pour l'industrie automobile [2]. Il autorise le moulage de pièces de dimensions moyennes à des cadences de près de 40 pièces à l'heure.

Les critères techniques du semi-produit élaboré pour le SMC ont été soigneusement déterminés :

- un taux de verre compris entre 45 et 50 % en masse pour obtenir un module d'Young de l'ordre de 14 GPa et une contrainte à la rupture supérieure à 150 MPa ;
- un système de résine présentant une excellente tenue au choc ;
- un retrait aussi faible que possible pour optimiser les jeux d'accostage ;
- une possibilité de coloration dans la masse ;
- une très bonne résistance thermique (100 °C en continu, 120 °C en pointe).

DSM a formulé un **système de résines vinylester renforcées par des fibres de verre** pour répondre à ces exigences et obtenir en plus de bonnes caractéristiques en fatigue grâce à une excellente adhérence fibres/résine.

Tableau 2 – Caractéristiques du SMC retenu pour le bloc avant

| Caractéristiques             | Méthodes d'essais | État initial | Après vieillissement climatique | Objectif |
|------------------------------|-------------------|--------------|---------------------------------|----------|
| Densité .....                | ISO 1183          | 1,89         |                                 | *        |
| Taux de verre..... (%)       | NF T 57-518       | 48           | 48                              | *        |
| Taux de charges .....        | NF T 57-518       | 21           | 21                              | *        |
| Module en traction .....     | NF T 57-101       | 14           | + 8 %                           | ≥ 15     |
| Contrainte en traction ..... |                   | 155          | + 2 %                           | ≥ 150    |
| Module de flexion .....      | NF T 57-105       | 14,6         | + 8 %                           | ≥ 15     |
| Contrainte en flexion.....   |                   | 270          | + 2 %                           | ≥ 250    |
| Limite de fatigue.....       | NF T 51-120       | 70           | 70                              | ≥ 50     |
| Absorption d'énergie .....   | NF T 50-118       | 2,6          | 2,6                             | ≥ 2,0    |
| Transition vitreuse .....    | NF L 17-451       | 195          | 195                             | ≥ 120    |

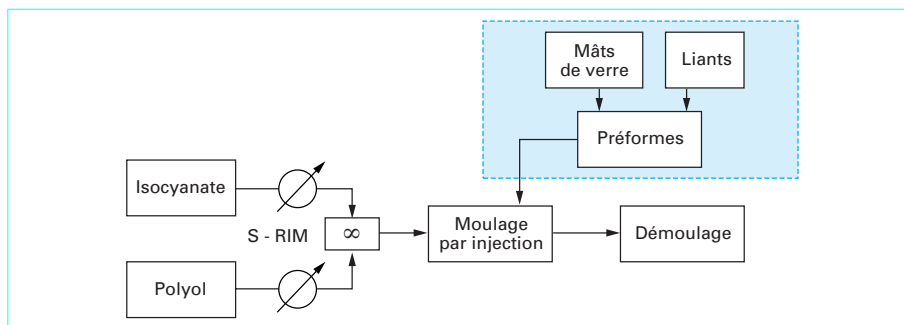


Figure 6 – Schéma du procédé S-RIM

Des presses de production de capacité 1 500 t ont été utilisées avec un contrôle du parallélisme des plateaux inférieur à 50 µm et un contrôle des températures du moule à ± 1 °C.

La stabilité dimensionnelle des pièces est garantie par des montages de refroidissement spécifiques. Les écarts dimensionnels entre les pièces sont inférieurs à 0,5 mm dans des conditions de moulage stables et maîtrisées, grâce à la formulation du SMC possédant un retrait proche de zéro. Le parachèvement et le perçage de trous de fixation ont été réalisés sur ces mêmes montages.

### Quelles résines pour le plancher ?

Les pièces de grandes dimensions telles que le plancher qui occupe une surface de 4 m<sup>2</sup> ont nécessité de mettre au point une nouvelle technologie de transformation pour composites. La technique S-RIM (Structural Reaction Injection Moulding) a servi de base à cette étude particulière.

Le principe de transformation en deux étapes est le suivant (figure 6).

**1<sup>re</sup> étape :** une préforme en fibres de verre continues est réalisée à partir de mâts de verre Unifilo de Vétrotex. Chaque mât contient un liant de préformage constitué de polymères thermoplastiques. 5 ou 6 mâts sont superposés en les croisant à 90° afin d'éliminer les effets d'orientation puis portés à une température supérieure à la température de fusion du liant. L'ensemble est ensuite introduit dans un moule de préformage qui réalise la « préforme » après démoulage et refroidissement. Le liant refroidi assure le maintien des fibres en l'état. L'ensemble des opérations est réalisé en automatique sur une ligne de préformage dédiée à cette opération.

**2<sup>e</sup> étape :** la préforme servant de renfort est mise en place dans le moule définitif constitué d'une matrice et d'un poinçon. Une résine bicomposants hautement réactive est injectée au travers d'une tête d'injection directement dans le moule. La résine après remplissage du moule en moins de 20 s commence à polymériser et la pièce est démoulée après 180 s.

La résine d'injection a été formulée par SIR filiale de Montedison sur le concept d'un hybride moléculaire. Une **résine polyuréthane est associée à une résine polyester** en réalisant au moment de l'injection deux réseaux tridimensionnels chimiquement différents qui s'interpénètrent.

Cet IPN (Interpenetrated Polymer Network) présente une séparation de phases induite par l'incompatibilité réciproque des polymères. L'interpénétration et la juxtaposition de réseaux moléculaires chimiquement différents confèrent une synergie intéressante au polymère réticulé : une résistance mécanique et thermique apportée par la matrice polyester et une résistance au choc assurée par la partie polyuréthane.

La réticulation est obtenue en moins de 3 min grâce au dosage précis de catalyseurs spécifiques à chaque composant de l'hybride :

- peroxydes pour la réticulation des chaînes polyester avec le styrène ;
- isocyanates pour réagir avec les polyols en formant un polyuréthane.

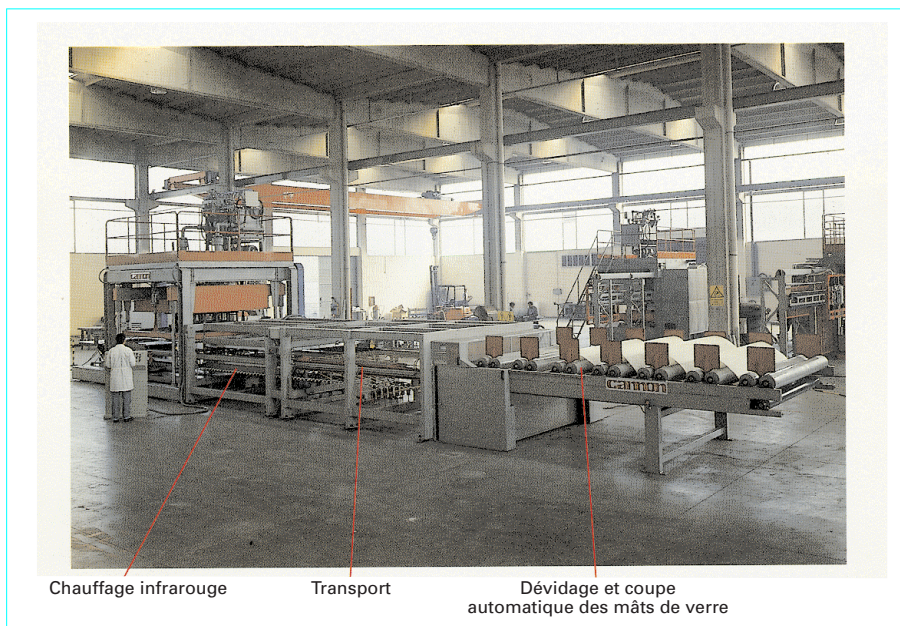
Chaque composant de la résine doit être stable à basse température afin d'assurer un stockage de longue durée, et en même temps le mélange doit posséder une cinétique ultra-rapide de réticulation.

La viscosité d'une telle résine à température ambiante est de l'ordre de 100 mPa · s équivalente à celle de l'eau. Malgré le taux de verre élevé qui crée des obstacles de perméabilité à l'écoulement de la résine, la très faible viscosité de la résine a permis d'injecter plus de 10 kg de polymères en moins de 20 s.

Il est intéressant de remarquer que l'augmentation de la viscosité lors de la réticulation présente un temps d'induction de moins d'une minute avant une montée exponentielle ; ce comportement représente la condition idéale pour obtenir une bonne fluidité lors de l'imprégnation de la préforme, suivie d'une vitesse de réticulation élevée lorsque le moule est complètement rempli.

**Tableau 3 – Caractéristiques du S-RIM retenu pour le plancher**

| Caractéristiques             | Méthodes d'essais | État initial | Après vieillissement climatique | Objectif |
|------------------------------|-------------------|--------------|---------------------------------|----------|
| Densité .....                | ISO 1183          | 1,63         | 1,63                            | *        |
| Taux de verre..... (%)       | NF T 57-518       | 50           | 50                              | 50       |
| Module en traction .....     | NF T 57-101       | 13,5         | + 3 %                           | > 14     |
| Contrainte en traction ..... |                   | 200          | - 3 %                           | > 150    |
| Module de flexion .....      | NF T 57-105       | 12,7         | + 3 %                           | > 14     |
| Contrainte en flexion .....  |                   | 340          | - 3 %                           | > 250    |
| Limite de fatigue .....      | NF T 51-120       | 65           | 65                              | > 50     |
| Absorption d'énergie .....   | NF T 50-118       | 2            | 2                               | > 2,0    |
| Transition vitreuse .....    | NF L 17-451       | 175          | 175                             | > 120    |



Chauffage infrarouge      Transport      Dévidage et coupe automatique des mâts de verre

groupe Montedison que chez Renault (figure 7). La photo représente la ligne de préformage avec au début la découpe des mâts Unifilo et leur empilement, puis le transfert sous le chauffage infrarouge avant d'être placés sous la presse de préformage.

## Des résultats sur la structure du véhicule

Le plan de validation d'un véhicule est destiné à vérifier que les critères fonctionnels jugés fondamentaux pour un usage en toute sécurité sont bien respectés : le jugement porté sur la structure Mosaic est fondé sur les résultats d'essais respectant un processus logique en premier lieu sur des éléments simples, puis sur des structures complètes enfin sur des véhicules roulants (§ 7).

**Figure 7 – Installation de préformage des mâts de verre**

L'intérêt de cette technique réside dans la faible pression d'injection de la résine qui autorise des forces de fermeture du moule faible de l'ordre de 50 bar. Ainsi, il est possible de mouler des pièces de très grandes dimensions sans nécessiter des presses de forte capacité réduisant ainsi très fortement les investissements ainsi que les coûts d'outillages.

Les propriétés du S-RIM mesurées sur éprouvettes prélevées sur plaques de 3 mm (tableau 3) sont intéressantes grâce à une contrainte en flexion extrêmement élevée supérieure à 300 MPa et à une limite de fati-

que de 65 MPa. La transition vitreuse de 175 °C est nettement supérieure à celle des résines polyuréthanes traditionnelles et permet d'éviter des pertes de propriétés du plancher à proximité de l'échappement (dont la température peut atteindre 800 °C !).

La technique S-RIM, dérivée du procédé RTM (Reaction Transfert Moulding), ne fait pas actuellement l'objet d'industrialisation dans l'industrie automobile en Europe.

Cependant, la faisabilité industrielle a été étudiée sur une ligne industrielle développée par Canon grâce aux investissements réalisés tant au Centre de Développement du

## Sur la rigidité

La raideur d'une structure est une caractéristique essentielle dont dépend la tenue de route du véhicule et son comportement dans des conditions extrêmes : virage à grandes vitesses, roulis, dos d'âne...

Les mesures de raideur sont parfaitement codifiées et permettent d'établir des comparaisons significatives entre différentes versions d'un même véhicule ou entre des véhicules de même gamme. Elles se déterminent en appliquant des contraintes de torsion et de flexion.

**Tableau 4 – Mesure de rigidité des structures Mosaïc**

| Raideur de caisse                      | Clio Mosaïc | Clio prototype (1) | Clio acier |
|--|-------------|--------------------|------------|
| Rigidité en torsion ..... (mrd)        | 2,40        | 2,33               | 1,48       |
| Flexion du bloc avant..... (mm)        | 1,60        | 1,23               | 1,27       |
| Flexion du plancher arrière ..... (mm) | 1,49        | 1,27               | 1,04       |
| Flexion du plancher..... (mm)          | 2,05        | 1,70               | 1,41       |

(1) Avec un bloc avant en aluminium

Le coefficient d'amortissement est également plus favorable (tableau 5) sur les versions hybrides que sur la structure acier. Ce résultat positif a permis de supprimer les insonorisants appliqués sur les tôles d'acier et donc d'apporter un gain de poids non négligeable.

Les mesures d'inertances (raideurs dynamiques mesurées entre 50 et 400 Hz) au niveau des supports moteurs et des trains permettent de conclure que :

- la raideur dynamique des points de fixation du moteur est satisfaisante dans toutes les directions sauf en transversal du côté droit ;

- la raideur des chapelles d'amortisseurs est excellente et supérieure au cahier des charges ;

- la raideur du support de l'amortisseur arrière est insuffisante, ce défaut étant lié à la raideur trop faible du plancher.

En conclusion, à l'exception du plancher trop souple sur la version hybride, les résultats de mesure vibratoire sont satisfaisants et confirment que les multimatériaux permettent d'assurer les raideurs globales et locales de la structure.

## Sur l'endurance

L'endurance sur bancs ou sur pistes permet de mettre en évidence les manques de fiabilité en condition de roulage extrême se traduisant essentiellement par des ruptures aux points de fragilité.

Les solutions hybrides ont montré un comportement en fatigue exemplaire sans aucunes ruptures ou défauts visibles : les essais préliminaires d'endurance sur bancs 4 vérins climatiques ont été complétés par des essais sur bancs 12 vérins ou sur pistes. Les essais ont été poursuivis au-delà des objectifs standards qui représentent un roulage « mauvaise route » de 3 000 km.

En conclusion, les véhicules répondent de manière positive aux critères d'endurance tout en réduisant la masse. L'utilisation du collage structural qui répartit les contraintes entre les pièces participe au bon comportement des structures hybrides.

Ces résultats expérimentaux confirment les données bibliographiques sur ce sujet [1].

## Sur le comportement aux chocs

La sécurité des occupants d'un véhicule automobile, constitue pour Renault « **un enjeu commercial majeur** » : minimiser les risques de lésions lors d'un accident, préserver l'habitacle et améliorer la retenue des occupants est

**Tableau 5 – Mesure des modes de vibration des structures : fréquences F et amortissement A**

| Mode de sollicitation | Clio Mosaïc |       | Clio prototype (1) |       | Clio acier |       |
|-----------------------|-------------|-------|--------------------|-------|------------|-------|
|                       | F (Hz)      | A (%) | F (Hz)             | A (%) | F (Hz)     | A (%) |
| Torsion               | 43,6        | 1,13  | 46,2               | 0,93  | 45,1       | 0,46  |
| Flexion 2 nœuds       | nd          | nd    | 58,7               | 0,63  | 53,5       | 0,60  |
| Flexion 3 nœuds       | 52,8        | 1,12  | 55,2               | 1,01  | 48,4       | 0,81  |
| Lacet du bloc avant   | 55,6        | 0,87  | 61,2               | 0,73  | 56         | 0,73  |
| Flexion du plancher   | 60          | 1,51  | 58,7               | 1,19  | 72         | 0,94  |

nd : non déterminé

(1) Prototype avec un bloc avant en aluminium

Les résultats obtenus au cours du projet sont donnés sur trois structures différentes : la référence Clio acier, la structure hybride aluminium composite et une version réalisée en remplaçant le bloc avant composite par un bloc avant en aluminium (tableau 4).

La torsion est déterminée en appliquant un couple entre les trains avant et arrière et en mesurant l'angle de torsion.

La flexion des blocs avant et du plancher arrière est obtenue en appliquant une force soit sur les longerons avant, soit sur les longerons arrière et en mesurant la flèche résultante.

La flexion du plancher se mesure en appliquant une force sur le tunnel et en mesurant la flèche résultante. Plus celle-ci est faible et plus la raideur sera élevée.

Les structures hybrides se révèlent légèrement plus souples que la structure Clio mais plus raide que certains véhicules de la concurrence.

La mesure de la rigidité est accompagnée d'une analyse modale permettant de caractériser les raideurs locales et donc d'intervenir par des renforcements locaux si nécessaires.

## Sur le comportement acoustique et vibratoire

Le comportement vibratoire est en relation directe avec le confort acoustique, aujourd'hui devenu un critère discriminant pour les véhicules modernes.

Les modes de vibration de la structure sont mesurés entre 0 et 200 Hz. Plus les modes de vibration apparaissent vers des fréquences élevées, moins la structure sera excitable et meilleur sera le confort acoustique des occupants. De même, plus le coefficient d'amortissement est élevé, meilleure est la filtration de la structure. Ces essais réalisés sur structure nue fournissent une indication précieuse sur la comparaison des structures, mais sont éloignés du comportement global du véhicule complet (ne sont pas pris en compte les bruits de roulage, la transparence acoustique du tablier, etc.).

Pour les fréquences des premiers modes de vibration (tableau 5) à l'exception du comportement moins bon du plancher, les résultats de mesure vibratoire sont satisfaisants comparés à la Clio acier et confirment que les matériaux aluminium et composites assurent le comportement acoustique souhaité.

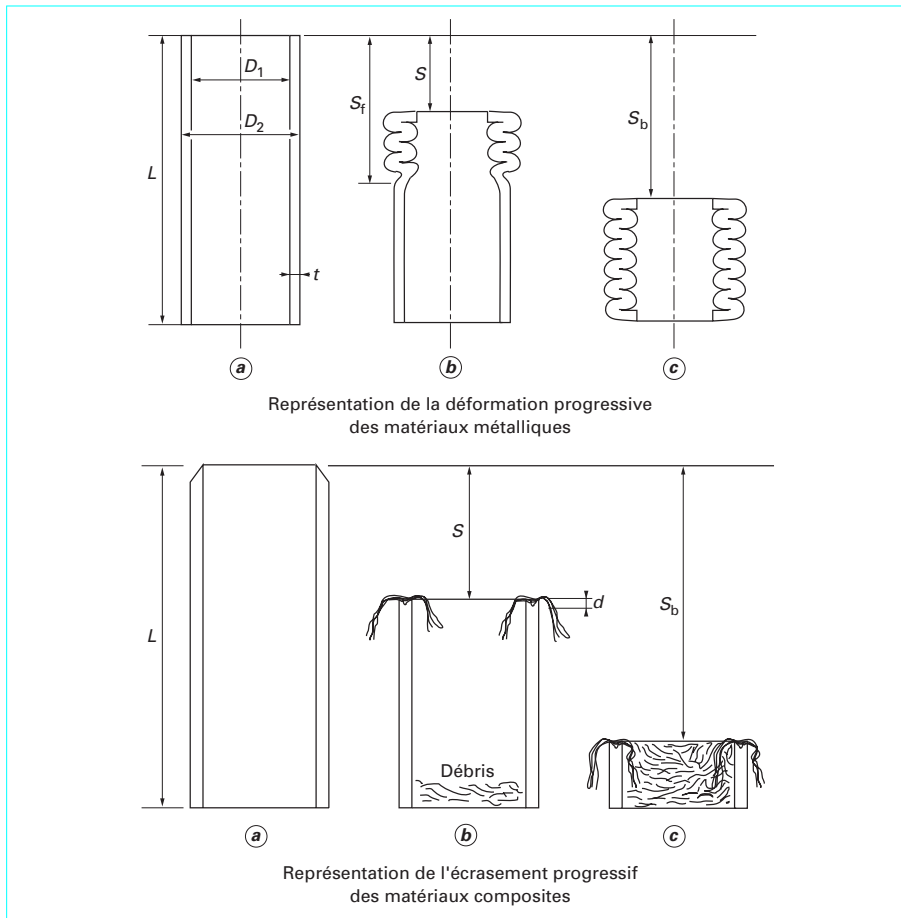


Figure 8 – Modes de rupture en fonction de la nature des matériaux

l'objectif des recherches menées dans le domaine de la sécurité passive depuis de nombreuses années.

Les études préliminaires sur éprouvettes, puis sur éléments de longeron ont démontré que l'absorption d'énergie par des composites est obtenue par la ruine progressive du matériau par délaminage par opposition à la déformation plastique des métaux (figure 8).

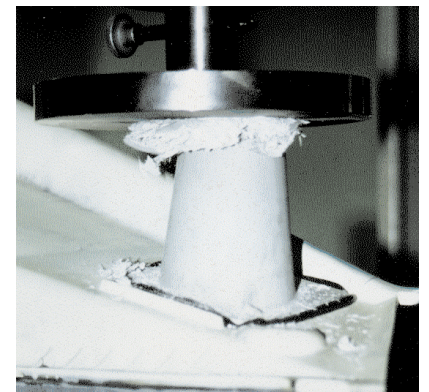
Les essais en statique (figure 9) ont montré le bon fonctionnement des cônes absorbeurs en BMC. On constate bien une destruction progressive du matériau qui s'amorce au sommet du cône et se poursuit pendant toute la durée de l'essai. La courbe contrainte en fonction du déplacement (figure 10) présente deux particularités :

— au début un pic d'effort provoqué par l'amorçage de la rupture ; ce pic peut être réduit en usinant un chanfrein au sommet du cône ;

— puis la contrainte reste constante pendant toute la durée de la compression et l'énergie absorbée est représentée par l'aire sous la courbe.

Ces résultats ont été confirmés lors de l'essai de choc à 15 km/h. Le comportement des cônes sous une contrainte dynamique est identique à celui observé en statique, ils absorbent pratiquement 70 % de l'énergie cinétique délivrée lors de l'impact. Ainsi, les dégâts sur véhicule sont faibles, ce qui induit une réduction importante des coûts de réparation.

Cependant à des vitesses plus élevées (20 km/h), on constate une faiblesse des joints collés avec des ruptures de type cohésive (par délaminage superficiel du composite). Afin de pallier cette défaillance, les assemblages ont été renforcés par collage-rievetage sur les véhicules testés.



Sous un effort de compression statique le BMC se délamine en se transformant en poussières et débris. Cette transformation s'accompagne d'une consommation de l'énergie produite par la force F de compression.

Figure 9 – Écrasement d'un cône en BMC

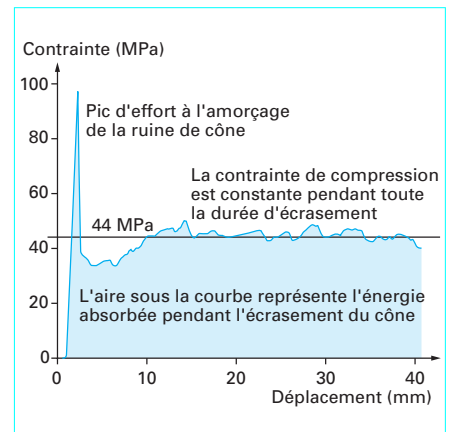


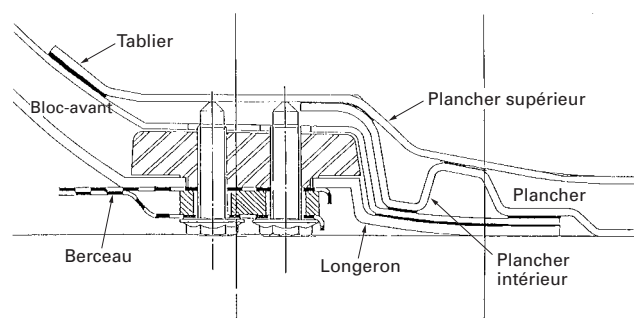
Figure 10 – Courbe d'écrasement statique du cône en BMC sans chanfrein

Les résultats obtenus lors des crash-tests à 50 km/h sont concluants (figure 11) : on obtient une ruine complète et répétitive des cônes en BMC, suivie de la ruine des longerons en SMC. Le bloc avant en composite montre une raideur initiale et des décélérations plus performantes que celles de Clio acier. L'enfoncement dynamique est supérieur de 7 %, cependant le véhicule passe avec succès la norme européenne ECE 12 qui réglemente la tenue aux chocs.

L'énergie absorbée sur 200 mm d'écrasement des longerons se situe entre 3,8 et 4,5 kJ. Ces valeurs peuvent être comparées à celle obtenue sur le longeron acier de la Clio qui s'élève à 4,5 kJ.



Figure 11 – Crash-test à 50 km/h contre un mur



Les parois en composites forment des corps creux caissonnés afin d'augmenter l'absorption d'énergie lors d'un choc frontal

Figure 12 – Liaison entre le bloc avant et le plancher (coupe au niveau de la fixation au berceau)

Le plancher est peu sollicité lors d'un choc arrière à 15 km/h et des réparations locales peuvent être envisagées à l'aide d'adhésifs bicomposants à température ambiante.

Par contre, dans un choc plus violent (50 km/h) le plancher absorbe l'énergie de fin de choc grâce à un système de liaison par corps creux successifs qui se ruinent successivement. Cette conception originale a fait l'objet d'un dépôt de brevet par Renault (figure 12).

## Sur le vieillissement et la corrosion

La tenue vis-à-vis de la corrosion pour les pièces métalliques, le vieillissement climatique pour les matériaux polymères sont également pris en compte comme critère sélectif.

Les essais en laboratoire ont permis de vérifier que les matériaux sélectionnés satisfaisaient le cahier des charges pour les tenues au vieillissement et en corrosion.

Les véhicules complets ont été testés en endurance sur des bancs 4 vérins climatiques avec des températures ambiantes variant de  $-10^{\circ}$  à  $42^{\circ}\text{C}$  accompagnées de taux d'humidité relative variant de 30 à 100 %. Ils ont été également soumis aux conditions des tests de corrosion accélérée sur pistes dans les mêmes conditions de sévérité que la Clio acier. Aucune perte de propriétés n'a été constatée sur les critères fondamentaux.

## Et sur route

Chaque prototype a été testé et caractérisé par les pilotes d'essais de Renault selon les modalités standards : il en résulte que ces véhicules ne présentent pas d'anomalies majeures en comportement et possèdent une tenue de route identique à la Clio acier. Ainsi, lors des essais de vieillissement accéléré par passage dans les « gués salés », les composites ont montré tout l'avantage qu'ils présentent vis-à-vis de la corrosion. Aucun traitement de protection n'a été appliqué, mieux, ils permettent d'éviter l'application des peintures, des insonorisants antivibratoires, des isolants acoustiques, des mastics d'étanchéité et des protections anti-gravillons sous caisses : ce qui se traduit par des économies substantielles tant au niveau des produits que du processus de fabrication.

## Un bilan technico-économique favorable

Ce bilan intègre les gains de poids obtenus sur les différentes versions et les chiffreages économiques tant sur le prix de revient de fabrication (PRF) que sur le montant des investissements nécessaire à leur industrialisation (tableau 6).

Le **bilan poids** des prototypes Mosaïc est établi sur un périmètre identique (la caisse en blanc sans les ouvrants).

La **masse** de chaque structure est mesurée avec une incertitude de  $\pm 0,2$  kg. Ces masses tiennent compte des éléments supplémentaires nécessités par une réalisation prototype (pièces rapportées ou existantes...). Elles ont donc été corrigées par calcul pour fournir des données optimisées dans la perspective d'une fabrication industrielle.

Le **chiffrage économique** a été réalisé à partir des données internes propre à Renault et celles des partenaires. L'évaluation des coûts prend en compte une cadence de production de 1 800 véhicules par jour. Il a été tenu compte du fait que les investissements capacitaires existent pour la version acier et ceux des versions aluminium/composites existent dans le tissu industriel européen. On

constate donc un coût de fabrication supérieur de 20 à 40 % selon les versions par rapport à la référence. Le principal handicap est dû au prix des matières premières 3 à 5 fois plus élevé que celui de l'acier. Cet écart devrait diminuer si les volumes augmentent.

L'utilisation de **matière recyclée** permettrait de gagner environ 50 % sur le prix matière de l'aluminium et 11 % en poids sur les pièces en composite SMC.

## Des matériaux recyclables

La stratégie adoptée pour traiter les véhicules en fin de vie et conçus sur la base de Mosaïc est de procéder au broyage de la caisse après extraction des fluides et démontage des fonctions accessibles et valorisables (par exemple les batteries au plomb).

Les résidus de broyage subissent des opérations de séparation mécanique et physique

des matériaux : métaux ferreux et non ferreux d'une part, polymères (thermoplastiques, composites, caoutchoucs, textiles, etc.) d'autre part. Ces derniers peuvent alimenter plusieurs filières de valorisation : comme combustible ou matière première pour les cimenteries ou comme charges renforçantes pour les enrobés routiers par exemple. L'ultime moyen étant la valorisation énergétique par incinération.

Dans l'hypothèse où les matériaux composites peuvent être extraits de la structure de manière économique, les filières de recyclage du SMC existent dès à présent : après broyage et tamisage par niveau de granulométrie, les rebroyés sont introduits comme charges dans les formulations de SMC en substitution des charges inertes comme le carbonate de calcium. Cette technique est déjà largement utilisée pour les rebuts de fabrication de SMC.

DSM a réalisé des lots de SMC recyclé et a ensuite moulé les pièces du bloc avant. La réduction de la densité est due au remplacement des charges par du recyclat de plus faible densité.

Les composites S-RIM à base de polyuréthane peuvent être recyclés :

— par **voie physique** ; des résultats très encourageants ont été obtenus par broyage des matériaux à une taille inférieure au millimètre et recompactage ; ainsi, de nouveaux composites ont pu être fabriqués, avec des caractéristiques assez intéressantes, pour application éventuelle dans la fabrication de pièces semi-structurales pour l'industrie automobile ou pour d'autres industries ; ces travaux, réalisés dans le cadre du projet Euréka-recap, ont montré une voie intéressante pour les composites à base de polyuréthane ;

— par **voie chimique** ; encore à l'état embryonnaire, cette voie a conduit à la récupération de nouveaux intermédiaires réactifs à partir du traitement chimique de composites broyés ; le produit obtenu (polyol recyclé) peut être réutilisé, en association avec des variantes d'isocyanates, pour toute une gamme d'applications, telles que des mousses rigides, des colles réactives voire même des composites de type RTM ;

— par incinération pour la **récupération d'énergie**, qui est actuellement envisagée comme la voie définitive et la plus complète pour le recyclage des matières plastiques.

**Tableau 6 – Bilan technico-économique des structures**

| Véhicule                                       | Clio acier | Clio Mosaïc | Écart (%)   |
|--|------------|-------------|-------------|
| Masse ..... (kg)                               | 203        | 164         | - 20        |
| PRF hors amortissement ..... (indice)          | 100        | 120 à 140   | + 20 à + 40 |
| Investissement hors capacitaires..... (indice) | 100        | 85 à 90     | - 15 à - 10 |

**Tableau 7 – Liste des brevets déposés par Renault**

| Numéro d'enregistrement | Date de dépôt | Titre du brevet  |
|-------------------------|---------------|--|
| 90-05891                | 11/05/90      | Structure plastique de séparation entre l'habitacle et le compartiment moteur d'un véhicule automobile |
| 91-00142                | 08/01/91      | Structure assemblée de plancher pour véhicule automobile avec réservoir de combustible intégré         |
| 91-00143                | 08/01/91      | Structure avant en matière plastique pour véhicule automobile  |
| 92-04395                | 10/04/92      | Structure de raccordement d'un panneau de véhicule automobile à une ossature périphérique              |
| 92-05210                | 28/04/92      | Ossature de carrosserie de véhicule automobile   |
| 92-05211                | 28/04/92      | Longeron latéral de châssis assemblé au plancher d'un véhicule automobile                              |
| 93-01395                | 09/02/93      | Procédé et dispositif de polymérisation rapide HF (haute fréquence)                                    |
| 93-04814                | 23/04/93      | Procédé et dispositif de polymérisation rapide d'une liaison collée par soudure à HF                   |
| 93-15060                | 15/12/93      | Procédé et installation pour le chauffage rapide d'une pièce par induction                             |
| 93-03181                | 19/03/93      | Châssis support d'un groupe motopropulseur   |
| 93-03183                | 19/03/93      | Structure porteuse d'une jambe de force de suspension d'un véhicule automobile                         |
| 93-03184                | 19/03/93      | Jonction d'un longeron avec une traverse et les montants d'une ossature de véhicule                    |

## Conclusions

### Des avantages mais encore des risques

La conception Mosaïc conduit à une réduction considérable du nombre de pièces, tout en satisfaisant largement la tenue en endurance, au choc et au vieillissement climatique. Une meilleure compréhension du comportement dynamique des joints collés permettra d'utiliser l'important potentiel d'absorption d'énergie des composites.

Les connaissances des constructeurs sur les comportements des matériaux ont fortement progressé grâce au projet Mosaïc. La maîtrise du choc est un des critères les plus difficiles techniquement à valider et à mettre au point.

Il n'en reste pas moins vrai que les composites restent en position de « challenger » vis-à-vis des matériaux traditionnels. Ils sont confrontés à des handicaps réels tels qu'une comparaison économique difficile avec l'acier qui reste la « référence », une connaissance encore insuffisante des lois de comportements des matériaux polymères, une intégration contraignante dans les processus

d'assemblage des usines d'assemblage existantes. Il s'agit d'une véritable rupture technologique qui obligerait à bouleverser les processus traditionnels de conception et de production et à reconsidérer les métiers qui interviennent dans le processus industriel d'aujourd'hui.

Des coûts des matières premières encore élevés et des cadences de production faibles sont des freins importants à la pénétration des composites sur les lignes de montage de grandes séries qui réclame un changement profond de la culture technique des Bureaux d'étude, une étroite synergie entre les concepteurs et les partenaires traditionnels que sont les Chimistes et les Transformateurs.

Cependant, ce projet a été une source importante d'innovations dans différents domaines touchant la conception ou la transformation des matériaux, ce qui s'est matérialisé par le dépôt de 12 brevets (tableau 7).

### Les retombées industrielles du projet Mosaïc

La version hybride aluminium et composites coûteuse pour la grande série est idéale pour les petites fabrications. Son application, à court terme, est envisagée sur des véhicules « niches » ou des variantes des véhicules de gamme.

Une retombée exemplaire du programme de recherche est apportée par le cabriolet à caractère sportif *Spider Renault*, directement issu de Mosaïc, dont la structure porteuse est réalisée en profilés d'aluminium et d'un plancher original double parois en nid d'abeille tandis que la peau est en composite polyester (figure 13).

Mais au-delà de cette application réussie, saurions-nous faire des voitures en grande série reprenant les solutions préconisées dans ce projet ? Ce n'est plus un problème d'interrogation technique sur le résultat... c'est un problème industriel. Il débouche nécessairement sur des investissements lourds de nouveaux moyens de production capables d'obtenir les performances demandées par le concepteur et d'assurer la répétabilité et la fiabilité nécessaire à une cadence de 2 000 voitures par jour.

Chaque voiture fabriquée doit être « bonne », c'est une exigence légitime du client final.

Dès à présent, ce programme de recherche est utilisé comme un réservoir de solutions qui, au fur et à mesure où elles atteindront un stade de développement suffisant et en accord avec les critères de qualité, seront introduites dans les véhicules de grande production.

#### ■ par Pierre VALERSTEINAS

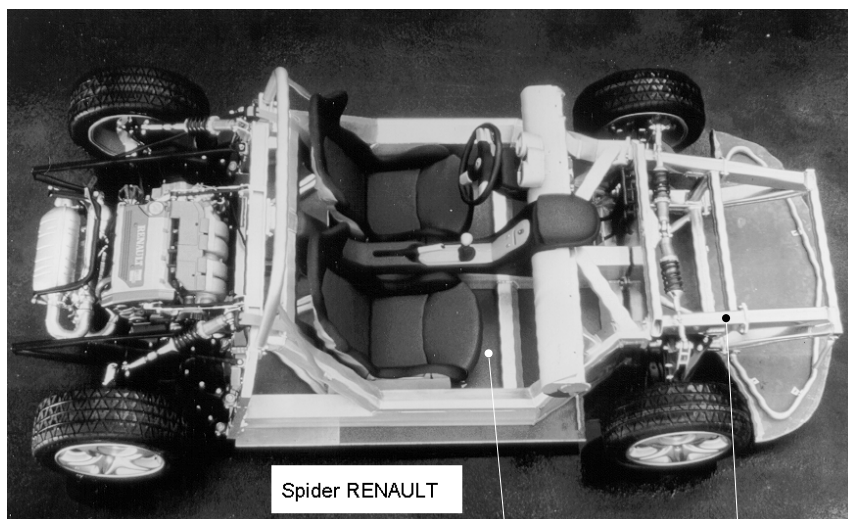
Ingénieur de l'École Nationale Supérieure de Chimie de Paris (ENSCP)

Renault

Direction de l'Ingénierie des Matériaux

### Références bibliographiques

- [1] ODRU (P.). – *Calcul et conception des structures composites*. A 7 792 (11-92) Techniques de l'Ingénieur, Traité Plastiques et Composites.
- [2] CANARD (P.). – *Polyesters insaturés*. A 3 445 (5-93) Techniques de l'Ingénieur, Traité Plastiques et Composites.



Spider RENAULT

Plancher en sandwich nid d'abeille

Structure en profilés d'aluminium

Figure 13 – Structure du véhicule *Spider Renault* en aluminium et composites