Revue de Métallurgie **108**, 427–435 (2011)
© EDP Sciences, 2012
DOI: 10.1051/metal/2011072
www.revue-metallurgie.org

Revue de Métallurgie

Contribution à l'allégement dans l'automobile : application à la liaison au sol★

M. Chauvin et B. Lascoup

Équipe Structure et Matériaux, ESTACA, rue Georges Charpak, 53000 Laval, France
e-mail : michael.chauvin@estaca.fr

Mots-clés :
Matériaux composites ; essieu semi-déformable ; dimensionnement ; automobile ; allègement

Résumé – Le but est d'innover dans le domaine des liaisons au sol en remplaçant une traverse d'un essieu arrière en acier à haute limite élastique par une traverse en matériaux composites : Fibre de verre et Epoxy ; tout en conservant les mêmes fonctions qui sont : assurer une rigidité de torsion, lier et maintenir en position les bras de suspension, résister aux sollicitations mécaniques du cahier des charges (nid de poule, choc trottoir, ...), reprendre les points de fixation du bras de suspension. Cette étude tient compte de la problématique de la grande série : minimiser le nombre de pièces, géométrie simple, procédé de fabrication simple avec des cadences élevées, facilité de montage. La démarche employée est la suivante : étape de présélection et intégration des profilés dans le modèle numérique, choix de l'empilement du composite et optimisation, choix d'une solution, conception des interfaces, réalisation d'un prototype. Le gain de masse est significatif puisque la traverse composite avec fixation ne pèse que 3,9 kg à comparer avec les 12,4 kg de la traverse initiale.

Key words:
Composite materials; twist-beam rear axle; lightening; automotive; redesign

Abstract – Contribution to lightening in the automotive industry: application of the twist-beam rear axle. The aim of this study was to use composite materials in the twist-beam rear axle to achieve lightening; therefore, we chose to design a new part on the twist-beam rear axle. This part must assume two functions: the anti-roll bar and the torsion beam. In the first instance, the maximum and incidental load cases were applied to a part in steel to set up the reference step. Moreover, the part must conserve a satisfactory torsional rigidity to guarantee the elasto-kinematic behaviour. Accordingly, a selection was made of the cross-sectional part to respect the torsional rigidity. With the results obtained, we were able to choose the appropriate composite material, taking into account the manufacturing process. For obvious reasons, the manufacturing process must be simple, given that the cycle time is very short. This implies a rigorous choice of the composite material. After this dimensioning step, we created a prototype with the design and composite chosen. This procedure permitted us to obtain a mass gain increase of 65% compared with the original part (mass = 12.4 kg).

Reçu le 26 novembre 2010
Accepté le 16 novembre 2011

Les enjeux essentiels qui poussent à l'allégement des véhicules sont la maîtrise des consommations énergétiques et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En France, les transports représentaient 27 % des émissions de gaz carbonique (CO_2) en 2002.

Face à l'enjeu que représente la réduction des émissions de gaz à effet de serre (notamment le CO_2), et dans le cadre des objectifs fixés par le protocole de Kyoto, la Commission européenne et les constructeurs automobiles présents sur le marché européen, ont conclu un accord volontaire : celui-ci prévoit des émissions de 130 g de CO_2/km en 2015, et de 100 g de CO_2/km à l'horizon 2020. L'allégement des véhicules doit participer, avec l'évolution des motorisations, à l'atteinte de ces objectifs.

La maîtrise des consommations énergétiques s'exprime également en termes économiques. Il faut retenir que dans l'automobile,

★ Cet article est basé sur la contribution au colloque 04 : « Matériaux pour le Transport », de la conférence « Matériaux 2010 », Nantes, 18–22 octobre 2010.

https://doi.org/10.1051/metal/2011072 Published online by Cambridge University Press Article publié par EDP Sciences

une réduction de 100 kg entraine un gain de 0,35 l/100 km pour une diminution de 9 g de CO_2/km. De ce point de vue, l'existence de véhicules peu consommateurs dans la gamme des constructeurs est un avantage concurrentiel important durant des périodes de renchérissement des prix du pétrole.

Les aspects précédents doivent être considérés en prenant en compte les autres enjeux du secteur des transports, notamment la sécurité. Ainsi, les véhicules « allégés » doivent présenter des performances au moins aussi bonne d'un point de vue mécanique.

Dans un premier temps, l'allègement d'un véhicule passa par l'emploi d'acier de qualité supérieure en utilisant les aciers HLE (Haute Limite Elastique) ce qui a permis de gagner 10 % de masse sur le châssis [1]. Pour continuer à alléger le châssis, certains constructeurs automobiles se sont intéressés à l'utilisation de l'aluminium pour gagner en masse. Pour aller plus loin dans le gain de masse, les constructeurs automobiles comme Peugeot, BMW et plus particulièrement Renault, ont étudié la possibilité d'introduire les matériaux composites dans le châssis. Le constructeur automobile Renault a conclu sur l'emploi d'un matériau hybride : aluminium et composite ; pour diminuer la masse tout en conservant sa tenue mécanique [2]. Quelques études confirment l'intérêt d'introduire des matériaux hybrides dans l'automobile pour gagner de la masse. En effet, une étude sur l'emploi d'un matériau hybride pour la réalisation d'un arbre de transmission inter-pont a montré un gain de masse de 75 % avec une augmentation du couple transmissible de 160 % par rapport à l'arbre en acier [3].

La problématique d'allégement sur la liaison au sol est apparue chez les fournisseurs pour proposer de nouveaux matériaux aux constructeurs automobiles, et répondre la demande de gain de masse. L'utilisation d'acier THLE (Très Haute Limite Elastique) a permis de réduire la masse globale de la liaison au sol de 20 % par rapport à la version antérieure [4,5].

De ce fait, l'objectif de cette étude est d'innover en introduisant des matériaux composites afin d'alléger les liaisons au sol. En effet, la traverse (pièce retenue pour l'étude) va être redimensionnée en utilisant des matériaux composites, en tenant compte des problématiques suivantes : minimiser le nombre de pièces, géométrie simple, procédé de fabrication adapté à des cadences élevées, facilité de montage ; mais aussi : assurer une rigidité de torsion, lier et maintenir en position les bras de suspension, résister aux sollicitations mécaniques du cahier des charges (nid de poule, choc trottoir, ...), reprendre les points de fixation du bras de suspension. Les aspects liés à la corrosion et au vieillissement ne sont pas traités directement dans cette étude. Mais, en regardant dans le milieu de la construction navale, l'emploi des matériaux composites, du type Fibre de verre avec Epoxy, donne des signes encourageants contre la corrosion, qui est inexistante, et le vieillissement [6].

1 Matériaux et modèle

1.1 Description de la pièce

En général, les liaisons au sol sont déclinées en plusieurs technologies différentes : semi-déformable, multi-bras, ... Cette diversité est due au niveau de prestations (confort, comportement routier) que souhaitent offrir les constructeurs automobiles aux clients. Dans notre cas, la liaison au sol choisie est un essieu semi-déformable comme le montre la figure 1. En effet, ce type de technologie est un bon compris entre les prestations et le coût.

Un essieu semi-déformable relie la roue au châssis. Ce dernier est composé de deux bras de suspension (1a et 1b), de deux amortisseurs (5a et 5b), de deux ressorts (4a et 4b), et d'une traverse (3). Cette dernière est la pièce considérée pour notre étude qui est en acier HLE. L'essieu semi-déformable est fixé par deux liaisons élastiques au châssis (2a et 2b) servant de point de rotation pour le débattement verticale des roues. De plus, ces deux liaisons aident au filtrage des vibrations venant de la route. La roue est relié à l'essieu semi-déformable par le porte-fusée (6). La traverse sert au redressement du véhicule lors d'un virage limitant ainsi la prise de roulis.

https://doi.org/10.1051/metal/2011072 Published online by Cambridge University Press

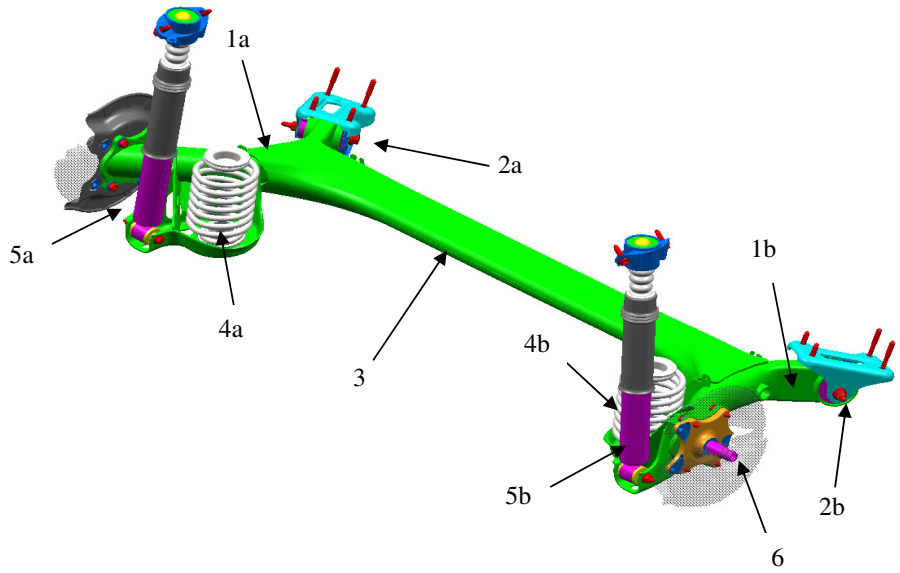


Fig. 1. Essieu semi-déformable.
Fig. 1. Twist beam rear axle.

Tableau 1. Liste des profilés.
Table 1. Form selection.

Désignation	Profilé
Profilé en U	
Profilé en V inversé	
Profilé en O	
Profilé avec 4 lames	

1.2 Liste des profilés

Une étude précédente a permis de lister les différents profilés existants dans l'industrie automobile [5], comme le montre le tableau 1. C'est à partir de cette liste que la sélection du profilé, répondant à nos critères, sera réalisée. Les profilés couramment employés par les constructeurs automobiles sont les profils en U, en V et en O.

Le souhait de cette étude est de trouver une solution qui s'adapte à la problématique liée à la production en moyenne ou grande série : temps de mise en forme, temps de séchage, . . . ; mais aussi pour la gestion de la liaison mécanique entre les bras de suspension et la traverse. De ce fait, le profilé avec quatre lames a été rajouté sur la liste car il pourrait répondre aux attentes du cahier des charges. Sachant que ces deux points sont perfectibles dans l'utilisation des matériaux composites à grande échelle.

1.3 Matériaux

Le tableau 2 montre les caractéristiques des matériaux composites choisis pour l'étude de dimensionnement. Ces caractéristiques ont été tirées de la littérature [5]. En effet, la difficulté dans les matériaux composites est de connaitre la totalité des caractéristiques en fonction du taux volumique de fibres mais aussi du type de tissage utilisé : Taffetas ou Unidirectionnel. Dans le tableau 2, les modules et les contraintes varient énormément en fonction de ces deux points. Dans le cas, où les données du matériau composite ne sont pas disponibles dans la littérature, des essais expérimentaux (traction, compression, flexion, . . .) doivent être réalisés selon les normes afin de déterminer chaque grandeur physique du tableau.

Pour les simulations et la réalisation du démonstrateur, les deux types de tissus ont été utilisés : Taffetas et Unidirectionnel. Les deux tissus sont en Fibre de verre, ce qui est justifié par son coût peu élevé par rapport

https://doi.org/10.1051/metal/2011072 Published online by Cambridge University Press

Tableau 2. Caractéristiques des matériaux.
Table 2. Characteristic materials.

Caractéristiques des matériaux	Taffetas Fibre de verre/Epoxy		Unidirectionnel Fibre de verre/Epoxy	
Taux de fibre (%)	30	50	45	60
Module élastique longitudinal (MPa) [E_l]	8000	20 000	38 600	46 000
Module élastique transversal (MPa) [E_t]	8000	20 000	8270	10 000
Module de cisaillement (MPa) [G]	2500	2850	4140	4600
Coefficient de Poisson [ν]	0,6	0,13	0,26	0,3
Contrainte de rupture en traction longitudinale (MPa) [X_T]	135	400	1062	1400
Contrainte de rupture en compression longitudinale (MPa) [Y_T]	72	390	610	910
Contrainte de rupture en traction transversale (MPa) [X_C]	135	400	31	35
Contrainte de rupture en compression transversale (MPa) [Y_C]	72	390	118	120
Contrainte de rupture en cisaillement (MPa) [S]	35	30	72	70
Densité [ρ]	1,56	1,9	1,83	2

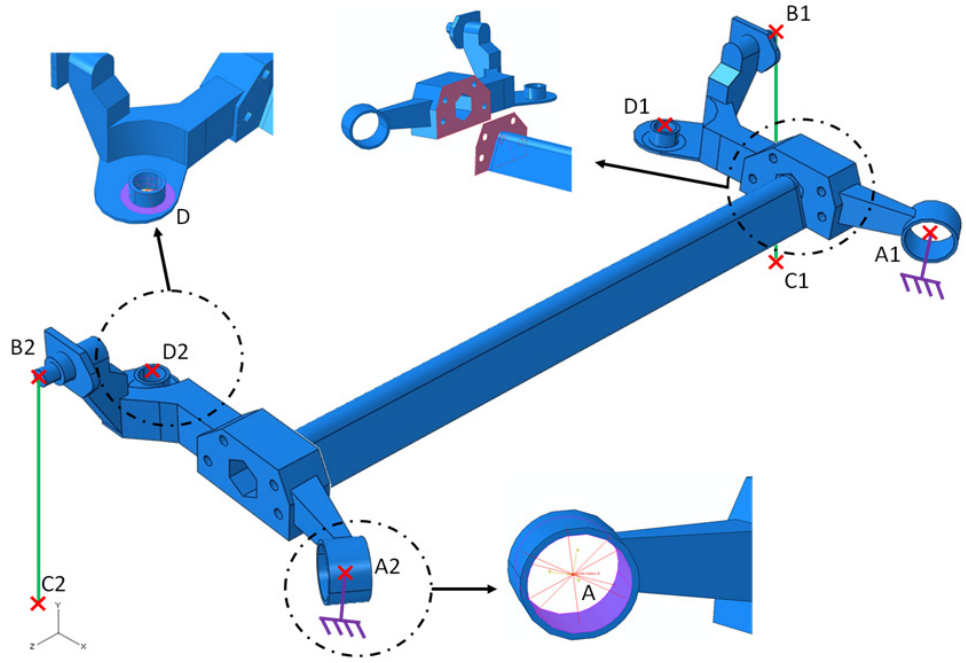


Fig. 2. Points d'application des conditions limitées.
Fig. 2. Application points of the loadcases and the boundaries conditions.

au Carbone ou au Kevlar, mais, avec des propriétés mécaniques moindre. Les deux tissus ont été associés à une résine Epoxy. Maintenant, une description du modèle s'impose pour mieux comprendre la démarche de dimensionnement de la traverse.

1.4 Modèle

Dans ce paragraphe, les conditions aux limites et les cas de chargement pour l'étude de la traverse vont être décrites.

1.4.1 Conditions aux limites

La figure 2 représente le modèle de la liaison au sol utilisé, pour le dimensionnent de la nouvelle pièce en matériaux composites. Dans le modèle, les bras de suspension sont considérés en acier.

Pour représenter l'articulation élastique entre le châssis et la liaison au sol en A1 et A2, l'emploi d'un élément « bushing » a été utilisé, permettant ainsi de donner une rigidité élastique dans les directions XYZ, mais aussi, autour de ces dernières.

https://doi.org/10.1051/metal/2011072 Published online by Cambridge University Press

Tableau 3. Cas de chargement issus de situations de vie.
Table 3. Loadcases of the driving conditions of the vehicle.

Chargement	Force/direction	Critères
Cahot	3,3 g en Z	Chargement maximum
Virage	1,2 g en Y	
Freinage	1,9 g en X	
Freinage en marche arrière	–1 g en X	
Nid de poule	1,5 g en X, 2,3 g en Z	
Roulis	+/– 50 mm en Z	
Freinage sur nid de poule	2 g en X, 1,8 g en Z	Chargement incidentel
Trottoir en marche arrière	–2,1 g en X	
Route pavé	3,6 g en Z, 2 g en X	
Trottoir	4 g en Y	

Les points D1 et D2 servent à modéliser la réaction du ressort sur la liaison au sol. En général, le ressort exerce une force de réaction qui est due la charge portée (masse du châssis).

La connexion entre la traverse et les bras de suspension est gérée par un encastrement. En effet, cette dernière est réalisée par une liaison vissée ou par un soudage.

Les points B1 et B2 symbolisent le centre de roue. Ils reprennent les efforts ou/et les moments appliqués respectivement sur C1 et C2. Ces derniers représentent le point de contact entre la roue et le sol. Il est le point où tous les chargements passent. Ces chargements peuvent être des efforts de freinage (selon X) de virage (selon Y) ou un moment (autour de Z). Seul l'effort dû à l'accélération est appliqué au centre de roue (B1 et B2).

1.4.2 Cas de chargement

Les cas de chargement sont issus de mesures embarquées sur un véhicule [4]. Ils sont représentatifs de situations de vie du véhicule comme une prise de virage, un freinage, . . . , comme le montre le tableau 3.

Ces situations de vie sont classées en deux critères : chargement maximum et chargement incidentel. Le premier cas représente l'effort appliqué à la liaison au sol ce qui va dimensionner sa tenue mécanique sous chargement. Le second cas représente un choc qui va permettre d'assurer sa tenue mécanique à la rupture. Pour compléter les cas de chargement, un cas supplémentaire a été rajouté, c'est le chargement en « roulis ». Ce chargement est important car il sollicite la traverse en torsion. Elle joue un rôle essentiel dans le redressement du véhicule en virage.

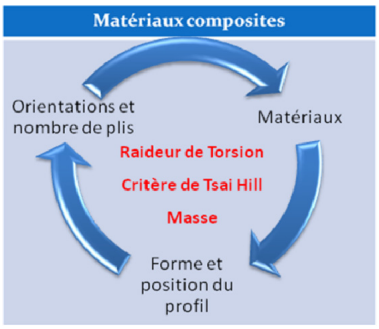


Fig. 3. Démarche de l'étude.
Fig. 3. Step of study.

2 Résultats et discussion

La liaison au sol est un élément essentiel dans la sécurité active du véhicule, et elle doit conserver sa rigidité de torsion pour garantir un bon comportement élastocinématique. La démarche de l'étude est décrite sur la figure 3.

Dans un premier temps, la forme et la position du profilé sont définies. Puis, l'orientation et le nombre de plis sont déterminés. Enfin, le choix des matériaux est arrêté. Cette démarche a pour but de vérifier que, à chaque itération, la raideur de torsion est garantie ainsi que la résistance à la rupture avec le critère de Tsai Hill [7]. À l'instar de Von Mises pour un matériau homogène et isotrope, le critère de Tsai Hill est utilisé dans les composites et les matériaux anisotropes pour caractériser la rupture du pli. Contrairement à Von Mises qui définit un niveau de

https://doi.org/10.1051/metal/2011072 Published online by Cambridge University Press

Tableau 4. Sélection du profilé.
Table 4. Form selection.

Profilé	Plis	Matériaux	Chargement	Tsai Hill	Masse théorique
Rond	13	UD 77 % Taffetas 33 %	Trottoir	0,68	2,14 kg
4 lames	39	UD 80 % Taffetas 30 %	Freinage sur nid de poule	0,77	10,9 kg

contrainte, le critère de Tsai Hill est un critère de rupture à comparer à 1. Au delà de cette valeur, il y a rupture du pli. Ce critère évalue la rupture dans un pli, ce qui veut dire qu'il regarde dans chacun des plis s'il est vérifie ou non. Il est important de noter que ce critère ne prend pas en compte le fait que le pli est sollicité en traction ou en compression. Le critère de Tsai Hill se détermine avec la formule suivante :

$$\frac{\sigma_{11}^2}{X^2} - \frac{\sigma_{11}\sigma_{22}}{X^2} + \frac{\sigma_{22}^2}{Y^2} + \frac{\sigma_{12}^2}{S^2} < 1$$

pour $\sigma_{11} > 0$, alors $X = X_T$ sinon $X = X_C$

pour $\sigma_{22} > 0$, alors $Y = Y_T$, sinon $Y = Y_c$

Le tout est, bien sûr, soumis à la contrainte de masse mais aussi au dimensionnement de la rigidité en torsion de la traverse. Ce dernier est le premier point à respecter dans notre cahier des charges. Du coup, il détermine le nombre de plis dans la structure. Il faut noter que l'objectif de réduction de masse est de 20 % pour la majorité des constructeurs automobile [4]. Plusieurs itérations ont été nécessaires pour obtenir la solution finale.

2.1 Choix du profilé

Après l'analyse des différents profilés, quelques uns ont été isolés car ils répondaient aux contraintes imposées.

Le tableau 4 montre ces profilés. Ils sont au nombre de deux. Sur ces profilés, un focus a été réalisé afin d'isoler la solution qui sera retenue pour réaliser le démonstrateur. Pour ce focus, deux critères principaux sont retenus : la valeur Tsai Hill et la masse. La valeur de Tsai Hill est fixée à 0,75 afin de garantir une marge de sécurité et de prendre en compte le phénomène de fatigue. En effet, la liaison au sol est un élément de sécurité dans l'automobile, au même titre que le système de freinage. D'où, la volonté de ne pas comparer le critère de Tsai Hill a une valeur unitaire mais inférieure. De plus, le tableau révèle la composition des plis ainsi que le chargement critique.

Cette démarche met en valeur un profilé en particulier qui répond aux contraintes. En effet, le profilé rond est le meilleur compromis en termes de nombre de plis, de valeur de Tsai Hill, et de masse. Le tableau 4 montre que le profilé rond possède un nombre de plis de 13, composés de 33 % de Taffetas et de 77 % d'Unidirectionnel. Ensuite, le cas de chargement critique est un chargement incidentel (choc trottoir), ce qui permet de conclure que, dans des situations de vie courante (chargement maximum), la tenue mécanique de la traverse est garantie. En effet, le critère de Tsai Hill est inférieur à la valeur 0,75 permettant, ainsi, d'assurer le niveau de sécurité exigé pour ce type d'organe. Enfin, la masse de la traverse atteint 2,14 kg ce qui est largement supérieure à l'objectif de 20 % fixé par les constructeurs automobiles [4].

Il faut noter que le profilé à quatre lames sont composées de 39 plis par lame, ce qui explique la masse élevée de ce profilé. De plus, ce dernier n'est pas résistant dans une situation de vie courante. De ce fait, le profilé retenu entre les deux présentés dans le tableau 4, est le profilé « rond ».

Ayant le profilé répondant aux critères de masse et de rupture, le paragraphe suivant va être consacré aux détails de l'empilement du matériau composite lié au profilé choisi.

2.2 Choix de l'empilement

Après plusieurs itérations et avec différents types d'empilement, le résultat final correspond à l'empilement suivant : $[90_2\ 45\ 90_3\ 45]_s$. Les plis orientés à 90° sont réalisés avec de l'Unidirectionnel et les autres plis correspondent au Taffetas avec un taux de fibre théorique d'environ 55 %.

https://doi.org/10.1051/metal/2011072 Published online by Cambridge University Press

Tableau 5. Contraintes maximum de Von Mises et valeur de Tsai Hill.
Table 5. Von Mises maximum stresses and Tsai Hill value.

Chargement	Contraintes de Von Mises maximum (MPa)	Tsai Hill	Critères
Cahot	154	0,41	Chargement maximum
Virage	117	0,32	
Freinage	88	0,26	
Freinage en marche arrière	46	0,14	
Nid de poule	142	0,60	
Roulis	107	0,57	
Freinage sur nid de poule	141	0,51	Chargement incidentel
Trottoir en marche arrière	107	0,29	
Route pavée	244	0,65	
Trottoir	276	0,68	

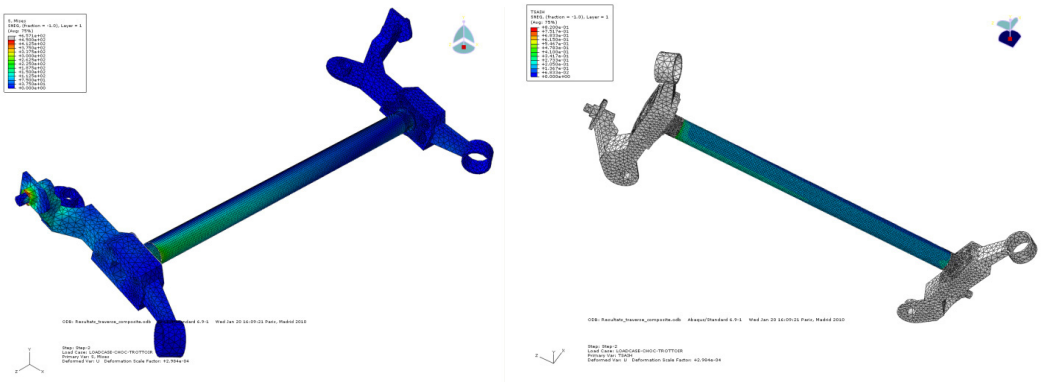


Fig. 4. Contraintes de Von Mises (gauche) et valeur de Tsai Hill (droite).
Fig. 4. Von Mises maximum stresses (left) and Tsai Hill value (right).

Le tableau 5 résume les contraintes maximum de Von Mises et les valeurs de Tsai Hill, pour le profilé considéré.

Comme le montrent le tableau 5 et la figure 4, le chargement maximum qui est le plus contraignant pour la traverse, est le nid de poule. La valeur de Tsai Hill atteint 0,60, elle est inférieure au seuil défini. Et la contrainte maximum de Von Mises est de 142 MPa. Pour le chargement incidentel, la contrainte maximum de Von Mises est de 276 MPa. Et, la valeur de Tsai Hill est de 0,68 ce qui est en-dessous de la limite. Ce chargement correspond à un choc trottoir.

Au vu des résultats obtenus, le démonstrateur peut être réalisé. Le profilé choisi est rond avec un empilement de $[90_2\ 45\ 90_3\ 45]_s$ composé de 13 plis, et formé de 33 % de Taffetas et de 77 % de Unidirectionnel.

2.3 Démonstrateur

Pour réaliser le démonstrateur, deux méthodes de fabrication ont été utilisés l'imprégnation manuelle et compactage sous bâche avec tirage de vide. Ces deux méthodes ont permis d'obtenir notre traverse en composite, comme le montre la figure 5.

Les masses respectivement sont de 12,4 kg pour l'acier et de 3,9 kg pour le composite, soit un gain de masse de 69 %. La masse de la traverse en composite tient compte des pièces pour la connexion entre les bras de suspension et la traverse. La pièce de liaison traverse/bras est en acier. Son design a été optimisé pour gagner en masse, tout en conservant une bonne tenue mécanique, comme le montre la figure 6. De plus, la traverse en composite est maintenue sur

https://doi.org/10.1051/metal/2011072 Published online by Cambridge University Press



Fig. 5. Traverse en acier (en bas) et en matériaux composites (en haut).
Fig. 5. Torsion beam steel (down) and composite material (up).

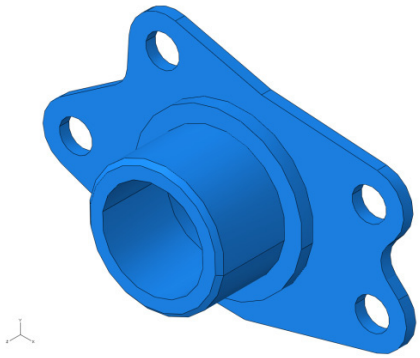


Fig. 6. Pièce de liaison entre la traverse et les bras de suspension.
Fig. 6. Steel link between trailing arm and torsion beam.

la pièce de liaison, par collage structural de type Epoxy.

De plus, une analyse du taux volumique de fibre a montré que l'association des deux méthodes atteint 60 %.

3 Conclusion

Pour gagner de la masse sur les liaisons au sol, l'utilisation des matériaux composites devient une solution non négligeable. La présente étude montre que le gain de masse est possible en remplaçant un élément en acier par un élément en composite.

Une nouvelle traverse en matériaux composites a été réalisée et fabriquée tout en tenant compte des problématiques suivantes : méthode de fabrication, rigidité de torsion, comportement élasto-cinématique, fatigue, mais aussi en assurant une rigidité de torsion, en liant et en maintenant en position les bras de suspension, en résistant aux sollicitations mécaniques du cahier des charges (nid de poule, choc trottoir, . . .), et en reprenant les points de fixation du bras de suspension.

De plus, les contraintes comme la masse et la valeur de Tsai Hill, ont permis d'arriver à une traverse en profilé rond, composé de 13 plis empilés sous la forme $[90_2\ 45\ 90_3\ 45]_s$ avec 33 % de Taffetas et 77 % de Unidirectionnel. Ceci permet de garantir un niveau de sécurité essentiel pour assurer un bon comportement routier du véhicule. Après avoir dimensionné la traverse en composite, la réalisation d'un démonstrateur a été faite. Le gain de masse obtenu est de 69 % entre la pièce en acier et la pièce en composite.

Les objectifs à venir sont de caractériser le comportement mécanique et élasto-cinématique de la traverse en composite, à l'aide de nos moyens d'essais comme le montre la figure 7.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier A. Bouard, D. Espinassou, G. Fourage, M. Fournier pour leur travail, ainsi que S. Gillet pour son assistance technique.

https://doi.org/10.1051/metal/2011072 Published online by Cambridge University Press

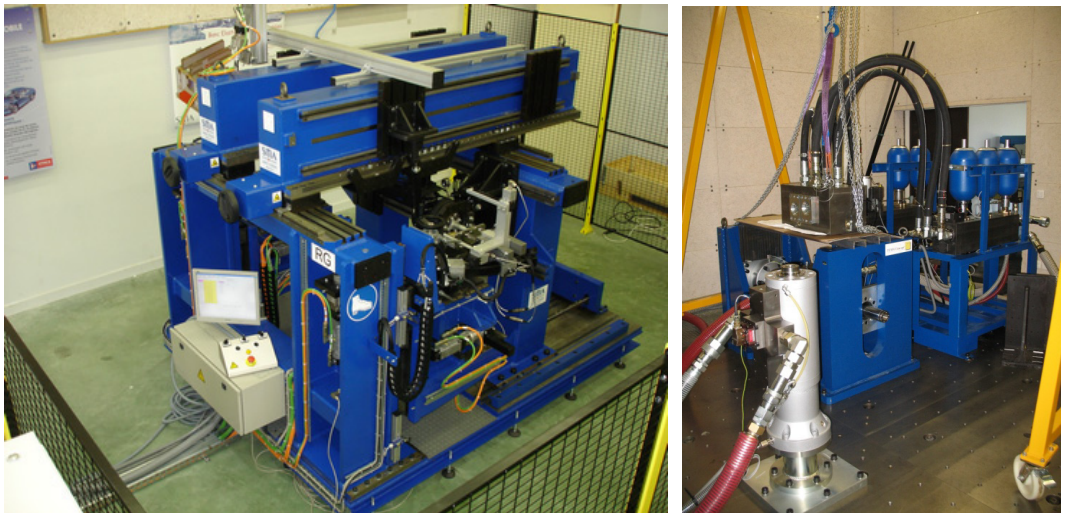


Fig. 7. Banc élasto-cinématique (droite) et moyen d'essai mécanique (gauche).
Fig. 7. Kinematic and Compliance System (right) and Mechanical Test Bench (left).

Références

[1] B. Cantor, C. Johnston, P. Grant, Automotive Engineering : Lightweight, Functional, and Novel Materials, Institute of Physics Publishing, 2008

[2] Technique de l'ingénieur : Projet Mozaïc, Structures automobile en composites et aluminium, AM 5605, 1998

[3] M. Chauvin, M. Amblard, Allègement des liaisons au sol par introduction d'Acier THR : méthodologie et résultats, 14ième Congrès international SIA Dynamique du véhicule, Lyon, France, 2007

[4] M. Chauvin, M. Amblard, A weight reduction study of chassis parts on the elasto-kinematic behavior and using advanced high strength steel, Vehicle Dynamics Expo, Stuttgart, Germany, 2007

[5] J. Choquer, R. Courant, B. Monot, J.B. Wagner, Étude sur les profils de traverse, rapport interne, 2009

[6] D. Lucas, P. Parneix, Les matériaux composites en construction navale militaire, Technique de l'ingénieur, AM 5660, 2000

[7] D. Gay, Composite Materials : Design and Applications, CRC Press Inc, 2007

https://doi.org/10.1051/metal/2011072 Published online by Cambridge University Press